



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise crítica da adequabilidade de disjuntores de alta tensão devido às solicitações de TRT – Estudo de casos

Aluno: Teodoro Massari de Andrade

Orientador: Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi

Ilha Solteira

2024

TEODORO MASSARI DE ANDRADE

**ANÁLISE CRÍTICA DA ADEQUABILIDADE DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO
DEVIDO ÀS SOLICITAÇÕES DE TRT – ESTUDO DE CASOS**

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do diploma no curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi**

Ilha Solteira

2024

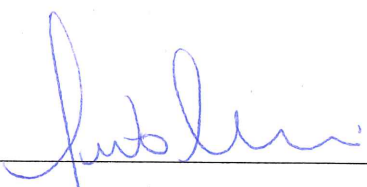
FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- A554a Andrade, Teodoro Massari de.
Análise crítica da adequabilidade de disjuntores de alta tensão devido às solicitações de TRT - estudo de casos / Teodoro Massari de Andrade. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
51 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024
- Orientador: Antonio Marcos Cossi
- Inclui bibliografia
1. Disjuntor. 2. Equipamentos de pátio de alta tensão. 3. Sistemas de transmissão. 4. TRT.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dezessete dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente *Teodoro Massari de Andrade*, matriculado sob o nº. 171053699, tendo como banca examinadora seu orientador o Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi, a Profa. Dra. Christiane Marie Schweitzer e a Profa. Dra. Erica Regina Marani Daruichi Machado, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "*Análise crítica da adequabilidade de disjuntores de alta tensão devido às solicitações de TRT – Estudo de casos*", obtendo a nota 10,0 (DEZ) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi

- orientador -



Teodoro Massari de Andrade

Teodoro Massari de Andrade

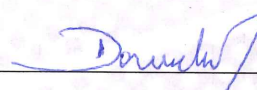
- discente -



Profa. Dra. Christiane Marie Schweitzer

Profa. Dra. Christiane Marie Schweitzer

- membro da banca -



Profa. Dra. Erica Regina M. Daruichi Machado

Profa. Dra. Erica Regina M. Daruichi Machado

- membro da banca -

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais José Teodoro de Andrade e Elicena Marta Massari de Andrade e ao meu irmão Victor Hugo Massari de Andrade, por todo apoio, seja ele financeiro ou emocional. Há de se ressaltar que durante a minha jornada acadêmica, dividi momentos e histórias junto com meu irmão, ex-aluno da UNESP de Ilha Solteira, onde estive ao meu lado enfrentando todos os momentos, sejam eles bons ou ruins. Agradeço imensamente por toda oportunidade e infraestrutura que me ofereceram.

Aos meus amigos da República Santo Grau, especialmente ao Felipe Fontes e Lucas Vilela, por terem me acompanhado durante grande parte do período de graduação, me aconselhando e apoiando independente de qual fosse a situação e sempre compartilhando momentos e histórias ao longo do tempo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi, pela grande ajuda em me orientar tanto para o estágio quanto para o trabalho de graduação.

Aos meus colegas de trabalho, engenheiros de aplicação Rafael Florencio Silva e Gustavo Magalhães Pinto Assis, por me darem todo o apoio e suporte técnico, durante a elaboração deste trabalho.

A todos os professores que já fizeram parte de minha educação e àqueles que ainda o farão.

RESUMO

O presente trabalho de graduação aborda o planejamento dos sistemas de distribuição e transmissão, destacando a importância da análise de transitórios eletromagnéticos para garantir a confiabilidade operativa desses sistemas. Enfatiza-se a relevância dos estudos cíclicos de superação de equipamentos, realizados pelos agentes responsáveis, para avaliar a adequação dos equipamentos às demandas da evolução da rede elétrica.

O foco central do estudo é a análise crítica de casos específicos relacionados à avaliação de desempenho de disjuntores em duas subestações interligadas por uma linha de transmissão. Essa análise visa subsidiar a correta especificação dos disjuntores, garantindo seu adequado funcionamento na rede. A Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é explorada como um parâmetro crucial, sendo definida como a componente transitória da tensão que ocorre durante a abertura do disjuntor para eliminar uma falta no sistema elétrico.

O cálculo da TRT é reconhecido como uma tarefa complexa, envolvendo diversos fatores e metodologias. As dificuldades básicas incluem a escolha da metodologia aplicável, a modelagem da rede elétrica e a definição de critérios de estudo e simulação. Destaca-se a importância da seleção criteriosa dos casos de estudo, considerando solicitações críticas para os disjuntores.

No âmbito das ferramentas utilizadas, o estudo menciona diversas abordagens, incluindo modelos em escala reduzida, simuladores analógicos, simuladores digitais e híbridos. Entre elas, destaca-se o software ATP (*Alternative Transient Program*) como uma ferramenta relevante para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica.

Os estudos de caso apresentados concentram-se em disjuntores de 362 kV em duas subestações interligadas por circuitos de transmissão de 345 kV, sob concessão da mesma empresa transmissora de energia elétrica. A análise crítica desses casos visa proporcionar insights valiosos para a especificação adequada dos disjuntores e, conseqüentemente, aprimorar a confiabilidade operativa do sistema de energia elétrica em questão.

ABSTRACT

This undergraduate thesis delves into the intricacies of planning distribution and transmission systems, emphasizing the critical role of electromagnetic transient analysis in ensuring the operational reliability of these systems. The cyclical studies of equipment overcoming, conducted by responsible entities, take center stage in evaluating the adaptability of equipment to the evolving demands of the electrical grid.

The primary focus of this study lies in the critical analysis of specific cases related to the performance evaluation of circuit breakers in two substations interconnected by a transmission line. This analysis aims to inform the accurate specification of circuit breakers, ensuring their optimal functionality within the network. The Transient Recovery Voltage (TRV) emerges as a pivotal parameter, defined as the transient voltage component occurring during the breaker's opening to eliminate a fault in the electrical system.

The calculation of TRV is acknowledged as a complex task, involving various factors and methodologies. Fundamental challenges include selecting applicable methodologies, network modeling, and establishing criteria for study and simulation. The meticulous selection of case studies, considering critical demands on circuit breakers, is emphasized as crucial.

In terms of tools employed, the study explores diverse approaches such as scaled models, analog simulators, digital simulators, and hybrid simulations. Notably, the ATP (Alternative Transient Program) software stands out as a relevant tool for electromagnetic transient studies in power systems.

The presented case studies focus on 362 kV circuit breakers in two substations interconnected by 345 kV transmission circuits, under the jurisdiction of the same power transmission company. The critical analysis of these cases aims to provide valuable insights for the accurate specification of circuit breakers, thereby enhancing the operational reliability of the electrical power system in question.

LISTA DE FIGURAS

Quadro 1 – Quadro resumo da superação por TRT	33
Figura 1 – Câmara de extinção de sopro transversal	23
Figura 2 – Câmara de extinção de sopro axial	24
Figura 3 – Envoltória a dois parâmetros	28
Figura 4 – Envoltória a quatro parâmetros	29
Figura 5 – Exemplo de disjuntor não superado por TRT	29
Figura 6 – Exemplo de disjuntor superado por TRT	30
Figura 7 – Taxa de crescimento da TRT	32
Figura 8 – Aplicação de faltas nos terminais de linha (F1) e barra (F2)	35
Figura 9 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória T60 com fator de 1º polo 1,5	36
Figura 10 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória T60 com fator de 1º polo 1,5	37
Figura 11 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória para T60 com fator de 1º polo 1,3 (CASO 2)	39
Figura 12 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica, fase B com valores máximos de TRT de 229,6kV e de TCTRT de 1,881 kV/ μ s (CASO 2)	39
Figura 13 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória para T30 com fator de 1º polo 1,3 (CASO 3)	40
Figura 14 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica, fase B com valores máximos de TRT de 268,9kV e TCTRT de 1,301kV/ μ s. Envoltória para T30 (caso 3)	40
Figura 15 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória para T30 com fator de 1º polo 1,3	42
Figura 16 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica, fase A com valores máximos de TRT de 288,5kV e TCTRT de 0,572kV/ μ s. Envoltória T30 com fator de 1º polo 1,3	42
Figura 17 – SE C1 – TRT na interrupção de falta monofásica na LT. Fase A com valor máximo de TRT de 359,4kV e TCTRT de 3,496kV/ μ s. Envoltória para L60	44
Figura 18 – Detalhe da figura 17	44
Figura 19 – SE C1 – TRT na interrupção de falta monofásica na LT, fase A com valor máximo de TRT de 360,6kV e TCTRT de 4,275k kV/ μ s. Envoltória para L60	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas de tensão	17
Tabela 2 - TRT e TCTRT máxima abertura de faltas terminais – terminal LT 345kV	36
Tabela 3 – Dados comparativos para o caso 1	38
Tabela 4 – TRT e TCTRT máxima abertura de faltas terminais – terminal LD para transmissora	38
Tabela 5 – Dados comparativos para o caso 2 e 3	38
Tabela 6 – TRT e TCTRT máxima abertura de faltas terminais – disjuntor 145kV	41
Tabela 7 – Dados comparativos para o caso 4	43
Tabela 8 – TRT e TCTRT para abertura de faltas quilométricas – terminal LT 345kV	43
Tabela 9 – Dados comparativos – CASO 5	45
Tabela 10 – TRT e TCTRT para abertura de faltas quilométricas – terminal LT 345kV para G1	45
Tabela 11 – Dados comparativos – CASO 6	47
Tabela 12 – Resultados obtidos a partir das simulações	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TRT	Tensão de restabelecimento transitório
TCTRT	Taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitório
ATP	Alternative Transient Program
SIN	Sistema Interligado Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
PDEE	Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
ANSI	American National Standards

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	13
2.1	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN)	13
2.1.1	Rede de transmissão	14
2.1.2	Subestações	14
2.1.3	Centros de Controle.....	14
2.1.4	Interligação Regional	14
2.1.5	Regulação e Normatização.....	15
2.1.6	Resiliência e Segurança	15
2.1.7	Planejamento e Expansão	15
2.1.8	Planejamento da expansão do sistema de transmissão	15
2.1.9	Plano de ampliações e reforços (PAR)	18
2.2	DISJUNTORES.....	19
2.2.1	PARTES CONTITUINTES	20
2.2.2	PROCESSO DE INTERRUPÇÃO.....	20
2.2.3	TÉCNICAS DE INTERRUPÇÃO.....	21
2.2.3.1	Disjuntores a ar comprimido	21
2.2.3.2	Disjuntores a óleo	23
2.2.3.3	Disjuntores a hexafluoreto de enxofre (sf6)	24
2.2.3.4	Disjuntores de dupla pressão.....	25
2.2.3.5	Disjuntores de única pressão.....	26
2.3	SUPERAÇÃO DOS DISJUNTORES	27
2.4	SUPERAÇÃO POR TRT.....	27
2.4.1	Componentes de frequência industrial e natural.....	31
2.4.2	TRT – parâmetros.....	31
2.4.3	TCTR – taxa de crescimento da TRT	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	METODOLOGIA ADOTADA DA TRT PARA FALTAS TERMINAIS E QUILOMÉTRICAS	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	CASO 1.....	36
4.2	CASO 2 e 3	38
4.3	CASO 4.....	41
4.4	CASO 5.....	43
4.5	CASO 6.....	45
4.6	RESUMO DOS CASOS.....	47
5.	CONCLUSÕES.....	49
.	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O planejamento dos sistemas de distribuição e transmissão requer a análise de estudos que busquem uma maior confiabilidade operativa desses sistemas. Dentre estes estudos, está a análise de transitórios eletromagnéticos, a qual é fundamental a susceptibilidade de falha dos equipamentos frente às condições de manobra.

Os estudos de superação de equipamentos são de caráter cíclico e visam avaliar a suportabilidade dos equipamentos existentes em relação às solicitações impostas pela evolução da rede como um todo. Tais estudos são de responsabilidade dos agentes envolvidos e se prestam a indicar a necessidade da substituição de equipamentos de manobra ou de proteção superados ou obsoletos tecnologicamente por outros adequados às condições atuais de operação do sistema.

Assim, este trabalho tem como objetivo fazer uma análise crítica em estudo de casos sobre a avaliação de desempenho de disjuntores pertencentes a duas subestações, interligadas por uma linha de transmissão (LT) com dois circuitos de transmissão, no que se refere a suportabilidade às solicitações de TRT. Tal análise deverá subsidiar a especificação correta destes disjuntores para um adequado funcionamento da rede (adequabilidade dos disjuntores).

No que diz respeito a Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), trata-se de um termo utilizado para especificar a componente transitória da tensão que surge entre os terminais do equipamento (no caso o disjuntor) quando da sua abertura sob eliminação de uma falta no sistema elétrico.

O cálculo da TRT é uma tarefa complexa, tendo em vista os diversos fatores que podem influenciar a determinação da mesma, inclusive a própria metodologia de cálculo. As dificuldades básicas para a realização de um estudo de TRT são a identificação da metodologia aplicável, a modelagem da rede elétrica e os critérios de estudo e simulação. A escolha dos casos a serem estudados deve ser feita criteriosamente, de forma que se considere as solicitações críticas para o disjuntor.

Várias ferramentas têm sido utilizadas ao longo dos anos em estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica. O estudo de fenômenos transitórios em sistemas elétricos pode ser realizado através de modelos em escala

reduzida, de simuladores analógicos, de simuladores digitais ou de simuladores híbridos. Dentre as ferramentas utilizadas em estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica podemos citar o software ATP (*Alternative Transient Program*).

Os estudos de caso considerados neste trabalho, os quais serão submetidos a análise crítica, foram feitos em disjuntores de 362 kV pertencentes a duas subestações (um em cada subestação), interligadas por dois circuitos de transmissão de 345 kV, sob concessão de uma mesma empresa transmissora de energia elétrica.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN)

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um conceito fundamental na área de energia elétrica, representando uma infraestrutura complexa que permite a geração, transmissão e distribuição de eletricidade de forma eficiente e confiável em um determinado país ou região. Esse sistema é projetado para garantir a disponibilidade contínua de eletricidade a todas as áreas geográficas, atendendo às demandas crescentes da sociedade moderna. A interligação de diversas fontes de geração, como usinas termelétricas, hidrelétricas, eólicas e solares, com uma rede de transmissão de alta tensão, possibilita o fornecimento de eletricidade em larga escala, otimizando a utilização de recursos energéticos e proporcionando maior segurança operacional.

Esse sistema é essencial para o desenvolvimento econômico, industrial e social de um país, uma vez que fornece energia elétrica para residências, empresas, hospitais, escolas e inúmeras outras instalações críticas. A interconexão de diferentes regiões geográficas em um SIN permite a troca de eletricidade entre áreas de excedente e deficiência, contribuindo para a estabilidade do sistema e para a redução de custos de operação.

A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferências de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água

armazenadas nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro. Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor de energia elétrica.

2.1.1 Rede de transmissão

A transmissão de eletricidade em alta tensão é realizada por meio de uma vasta rede de linhas de transmissão, subestações e transformadores. Essa rede interconecta as áreas de geração às áreas de consumo e possibilita a transferência eficiente de eletricidade por longas distâncias. A rede de transmissão é monitorada e controlada de forma centralizada para manter a estabilidade do sistema.

2.1.2 Subestações

As subestações são instalações que convertem a tensão da eletricidade para níveis apropriados para transmissão e distribuição. Elas desempenham um papel fundamental na regulação do fluxo de energia e na proteção do sistema contra sobrecargas e falhas.

2.1.3 Centros de Controle

O SIN é gerenciado por centros de controle que monitoram constantemente a demanda e a oferta de energia, ajustando a geração conforme necessário para manter o equilíbrio entre esses dois fatores. Isso envolve previsão de demanda, controle de tensão e ação rápida em casos de contingências.

2.1.4 Interligação Regional

Uma característica crucial do SIN é a interligação entre diferentes regiões geográficas. Isso permite a transferência de eletricidade entre áreas com excesso de produção e aquelas com necessidade adicional. A interligação regional contribui para a estabilidade do sistema e ajuda a evitar apagões.

2.1.5 Regulação e Normatização

A operação do SIN é regulamentada por órgãos governamentais responsáveis pela energia elétrica. Normas e regulamentos são estabelecidos para garantir a segurança, a confiabilidade e a eficiência do sistema, bem como a promoção de práticas sustentáveis.

2.1.6 Resiliência e Segurança

O SIN é projetado com redundâncias e mecanismos de segurança para garantir a resiliência do sistema em face de desastres naturais, falhas técnicas ou cibernéticas. A proteção contra eventos adversos é uma característica fundamental para manter a disponibilidade de energia elétrica.

2.1.7 Planejamento e Expansão

O SIN é planejado e expandido para atender às crescentes demandas de eletricidade. O planejamento considera a necessidade de infraestrutura adicional, como novas usinas, linhas de transmissão e subestações.

Em resumo, o Sistema Interligado Nacional é uma rede elétrica complexa e crucial para o fornecimento confiável da energia em uma nação ou região. Sua estrutura, planejamento, regulação e diversificação de fontes de geração são fundamentais para atender às necessidades crescentes de eletricidade, ao mesmo tempo em que se mantém a segurança e a estabilidade do sistema.

2.1.8 Planejamento da expansão do sistema de transmissão

A EPE (Empresa de Pesquisa Energética) é responsável pelo planejamento da expansão do sistema de transmissão de energia elétrica no SEB (Sistema Elétrico Brasileiro) por meio do Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (PDEE), considerando um horizonte futuro de 10 anos. A meta é garantir uma expansão robusta da transmissão para proporcionar aos agentes de mercado um acesso livre à rede, criando um ambiente propício para a competição na geração e comercialização de energia elétrica. Essa expansão desempenha um papel crucial na interligação dos

submercados, facilitando a equalização de preços de energia ao minimizar estrangulamentos entre eles e promovendo um despacho ótimo do parque gerador.

Os estudos para o PDEE são baseados em Projeções de Mercado e no Plano de Geração, utilizando previsões de carga e geração para formular opções de expansão do sistema de transmissão. Essas alternativas são analisadas para verificar seu desempenho em condições normais, de emergência e dinâmicas. Opções que requerem o uso de recursos como corte de carga ou geração são descartadas.

As alternativas de expansão são concebidas, comparadas e submetidas a análises de desempenho em regime normal, incluindo a avaliação de fluxos de potência nas linhas de transmissão, carregamento dos transformadores e tensões nas barras de interesse. Posteriormente, são realizadas análises de contingência para testar o desempenho em emergências, verificando sobrecargas em elementos e tensões nas barras. O desempenho dinâmico das opções de expansão também é avaliado para garantir a estabilidade do sistema diante de perturbações.

Após verificar a equivalência técnica, a alternativa vencedora é aquela que apresenta o menor custo global, composto pelos investimentos e pelas perdas elétricas ao longo do período de concessão. A alternativa escolhida para expansão pode incluir diferentes equipamentos, como novas linhas de transmissão, transformadores e dispositivos de compensação de energia reativa.

A avaliação técnica é conduzida com base em vários critérios, destacando-se:

- Cenários de despacho e intercâmbio energético;
- Limites de carregamento;
- Contingências;
- Critérios de tensão.

Os cenários de despacho são pré-determinados para considerar diversas distribuições de fluxos de potência. Da mesma forma, os cenários de intercâmbio energético entre regiões são definidos antecipadamente para garantir a imparcialidade na análise técnica.

Estabelecer os limites de carregamento para linhas de transmissão e transformadores é uma premissa crucial. Para transformadores, pode-se permitir alguma ou nenhuma sobrecarga. No caso de linhas de transmissão, são definidos carregamentos

para operação normal e em emergência, geralmente considerando os limites correspondentes à condição mais desafiadora, como no "verão com sol".

Outro critério técnico essencial é a definição das contingências a serem estudadas, ou seja, quais elementos devem ser desligados um a um para realizar análises de rede degradada ou condições de emergência.

As tensões nos barramentos de carga da Rede Básica e da Rede de Distribuição devem permanecer dentro das faixas estabelecidas na Resolução ANEEL nº 505/2001, conforme apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de tensão.

Classe de tensão	Tensão mínima (p. u.)	Tensão máxima (p. u.)
$V \geq 230 \text{ kV}$	0,95	1,05
$69 \text{ kV} \leq V < 230 \text{ kV}$	0,95	1,05
$1 \text{ kV} \leq V < 69 \text{ kV}$	0,93	1,05

Fonte: Resolução ANEEL nº505/2001

Geralmente, são consideradas tensões mínimas de 0,90 p.u. em situações de contingência. Nos pontos de interconexão entre a rede principal e o sistema das distribuidoras, busca-se adotar o valor mínimo de tensão de 1,00 p.u., independentemente da carga ou das condições normais de operação.

Para a avaliação econômica, são estabelecidos critérios adicionais, com os principais listados a seguir:

- Custo dos equipamentos;
- Taxa anual de retorno;
- Mínimo custo global.

Uma premissa crucial para a análise econômica das opções é a determinação dos custos associados a linhas de transmissão, subestações e outros equipamentos, visando quantificar o investimento atribuído a cada alternativa.

A taxa anual de retorno é empregada para calcular o valor presente, ano a ano, das perdas elétricas previstas no sistema ao longo do período de concessão. Isso é feito considerando um aumento anual no custo da energia.

O critério principal para determinar a alternativa vencedora é o mínimo custo global, estabelecendo como objetivo do estudo o atendimento às necessidades do subsistema analisado com o menor custo possível.

2.1.9 Plano de ampliações e reforços (PAR)

O Plano de Ampliações e Reforços (PAR) expressa a perspectiva do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) sobre as expansões e melhorias necessárias na rede básica para preservar o desempenho adequado, garantir o pleno funcionamento do mercado de energia elétrica e viabilizar o livre acesso, dentro de um horizonte de três anos. Os estudos que levaram à formulação do PAR são descentralizados e conduzidos por diversos Grupos Especiais, abertos à participação de todos os agentes, cobrindo as Regiões Sul, Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste

O PAR, portanto, é uma elaboração detalhada dos estudos de planejamento para a expansão dos sistemas de transmissão, visando identificar as datas em que as ampliações e reforços são necessários.

Na etapa de planejamento da expansão do sistema de transmissão, não é realizada uma análise do impacto sistêmico da entrada em operação das novas instalações nos equipamentos terminais existentes, como disjuntores, chaves seccionadoras, bobinas de bloqueio e transformadores de corrente. A avaliação de superação desses equipamentos é de responsabilidade do ONS, conforme estabelecido pela Resolução Normativa nº 158 de 23/05/2005 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

O início da análise de superação de equipamentos se dá com o Relatório de Estudos de Curto-Circuito, emitido anualmente pelo ONS. Este relatório avalia, no horizonte de três anos do PAR, os níveis de curto-circuito, identifica barras do SEB com possíveis problemas de superação de disjuntores e analisa a evolução dos níveis de curto-circuito. Além disso, o ONS, em colaboração com os agentes do SEB, identifica os casos de superação de equipamentos com base em critérios previamente estabelecidos, sendo a lista desses equipamentos superados publicada anualmente no PAR.

2.2 DISJUNTORES

Um disjuntor tem a função de gerenciar sistemas elétricos de potência através da realização de manobras de chaveamento. “Quando ocorre uma falta no sistema de potência, os disjuntores mais próximos devem isolar o trecho defeituoso o mais rápido possível, de forma a minimizar os efeitos da falta sobre o restante do sistema”. (AMON F°, 1987, p.341).

Conforme Amon F° (1986, p.5), é essencial que o disjuntor desempenhe suas funções de maneira contínua, tanto na posição fechada quanto na posição aberta. Quando fechado, deve conduzir correntes de carga, e quando aberto, deve proporcionar isolamento elétrico. O disjuntor também é responsável, em certas ocasiões, por realizar manobras de fechamento e abertura para interromper correntes de magnetização em reatores e transformadores, correntes normais de carga, além das correntes capacitivas que surgem em bancos de capacitores e em linhas energizadas a vazio.

É crucial destacar que o disjuntor tem a obrigação de fechar e isolar circuitos elétricos, independentemente de estar operando em condições de curto-circuito ou em condições normais.

As funções mais frequentemente desempenhadas pelos disjuntores são, em primeiro lugar, a condução de correntes de carga na posição fechada, seguindo-se o isolamento entre duas partes de um sistema elétrico. Os disjuntores são, em geral, chamados a mudar de uma condição para outra ocasionalmente, e a desempenhar a função de abrir faltas ou fechar circuitos sob falta apenas muito raramente, de acordo com Morais (1985, p.188)

Como já citado anteriormente, “a interrupção de correntes de falta é considerada a condição de manobra mais severa a que um disjuntor pode ser submetido e quanto maior for a corrente de falta, maior será a solicitação imposta ao disjuntor”. (AMON F°, 1987, p.341).

Com relação ao tempo em que o disjuntor deve ser capaz de abrir após o mesmo ter permanecido fechado por um longo tempo, Morais (1985, p.188) comenta que estes equipamentos “devem ser mecanicamente capazes de abrir em tempos tão curtos quanto 2 ciclos, após terem permanecidos na posição fechada por vários meses”. E

acrescenta que “esta exigência impõe cuidados especiais no projeto do equipamento, no sentido de reduzir a um mínimo as massas das partes móveis e de garantir a mobilidade das válvulas, ligações mecânicas, etc”.

2.2.1 PARTES CONTITUENTES

Segundo Gabaglia et ali (1980 apud Moraes, 1985, p;193) os disjuntores são constituídos por: “partes condutoras de corrente; partes isoladoras; dispositivos de extinção dos arcos; mecanismos de operação; componentes auxiliares”.

2.2.2 PROCESSO DE INTERRUPÇÃO

Depois que os contatos do disjuntor foram mecanicamente separados para interromper o curto-circuito, surge um arco elétrico entre esses contatos. Esse fenômeno ocorre devido à impossibilidade de uma variação instantânea da corrente, em virtude da conservação do fluxo magnético nas indutâncias do circuito. Assim, inicia-se o processo de extinção desse arco que se forma no interior do disjuntor (AMON F°, 1986, p.6).

Esse processo será explicado a seguir, de maneira resumida, pois no próximo capítulo, que trata sobre a Superação de Disjuntores, a explicação ocorrerá com mais detalhes.

1ª etapa: Durante a separação mecânica dos contatos do disjuntor, simultaneamente, realiza-se o resfriamento do meio na câmara de extinção. Esse resfriamento resulta em uma deformação e alongamento do arco, sem, no entanto, extingui-lo. O efeito obtido é a prevenção de reacendimentos por meio da reiguição térmica (AMON F°, 1986, p.6).

2ª etapa: É importante salientar que a corrente em consideração é do tipo alternada. Assim, o arco elétrico somente será extinto quando a corrente atingir o valor zero.

3ª etapa: Após a extinção do arco, as capacidades térmica e dielétrica da câmara de extinção começam a se restabelecer. Nesse momento, uma tensão se forma através dos contatos do disjuntor, buscando reacender o arco, seja por meio da reiguição térmica ou pela ruptura do dielétrico (AMON F°, 1986, p.6).

Essa tensão é composta por elementos que oscilam em duas frequências distintas. Alguns desses elementos oscilam em uma frequência determinada pelos parâmetros da rede, conhecida como frequência natural, e decaem exponencialmente devido a perdas, como o efeito skin, resistências do circuito, efeito corona, entre outros. Outro componente oscila na frequência das fontes de tensão, denominada frequência industrial (AMON F°, 1986, p.6).

Amon F° (1986, p.6) afirma que “a combinação dessas componentes resulta numa tensão que possui um transitório inicial de frequência elevada [...] e em seguida atinge o regime permanente a uma frequência pequena”. A tensão de frequência elevada é chamada de Tensão de Restabelecimento Transitório – TRT, e a tensão de frequência pequena é a Tensão de Restabelecimento à Frequência Industrial – TRFI.

É indispensável que uma determinada condição seja atendida para que a interrupção da corrente ocorra de fato. “[...] as suportabilidades térmica e dielétrica do disjuntor devem ser sempre superiores à tensão de restabelecimento transitória. Portanto, a capacidade de interrupção de um disjuntor é determinada pela magnitude da corrente de falta e pela tensão de restabelecimento transitória através dos seus contatos”. (AMON F°, 1986, p.7).

2.2.3 TÉCNICAS DE INTERRUPÇÃO

As principais metodologias utilizadas para a interrupção em disjuntores incluem: ar livre, sopro magnético, vácuo, ar comprimido, óleo, hexafluoreto de enxofre e semicondutores. A seguir, abordaremos mais detalhadamente algumas dessas técnicas.

2.2.3.1 Disjuntores a ar comprimido

Esses disjuntores alcançam a extinção do arco elétrico ao introduzir ar comprimido nas câmaras. O jato direcionado à área entre os contatos resulta no resfriamento do arco elétrico e na compressão da câmara (MORAIS, 1985, p.190).

Atualmente, as câmaras de interrupção desses disjuntores estão sob pressão constante e contínua. O procedimento de sopro de ar inicia com a abertura das válvulas para a atmosfera, resultando no influxo de ar comprimido nas câmaras. Esse fluxo na

área entre os contatos é responsável por resfriar e prolongar o arco elétrico (VORPE; FILHO; FRANÇA, 1995, p.35).

Existem dois tipos de câmaras de extinção nestes disjuntores, as câmaras de sopro axial em uma direção e as de sopro axial em duas direções. Vorpe, Filho e França (1995, p.35) afirmam que “nos disjuntores de sopro numa única direção, o fluxo do ar comprimido para a atmosfera se dá através do contato móvel”.

Já nos disjuntores de sopro em duas direções, ocorre que “uma válvula de sopro principal e uma auxiliar são abertas para a atmosfera, dando origem a um fluxo de ar através dos contatos móvel e fixo”. (VORPE; FILHO; FRANÇA, 1995, p.35).

Os disjuntores que utilizam ar comprimido são recomendados em situações que demandam uma capacidade de interrupção significativa. Isso ocorre devido à rapidez na interrupção proporcionada por esse tipo de disjuntor, à intensidade substancial do sopro e às boas propriedades dielétricas do ar comprimido (VORPE; FILHO; FRANÇA, 1995, p.36).

De acordo com Moraes (1985, p.191), esses disjuntores podem operar conectados a uma central de ar comprimido ou contar com compressores individuais. Ele destaca que, se a pressão do ar comprimido cair abaixo de um determinado nível, a operação dos disjuntores pode se tornar arriscada. Por essa razão, os disjuntores são equipados com dispositivos que impedem a abertura ou o fechamento quando a pressão está abaixo de valores predefinidos. Além disso, se a pressão exceder os níveis preestabelecidos, os disjuntores podem ser dotados de dispositivos de abertura.

O disjuntor a ar comprimido deve sempre garantir a “[...] permanência de um valor mínimo de pressão de ar comprimido, com rigidez dielétrica suficiente para impedir reacendimentos do arco elétrico [...]”. (VORPE; FILHO; FRANÇA, 1995, p.37). Essa garantia deve ocorrer em situações em que não é “[...] possível impedir a queda da pressão interna do disjuntor e, conseqüentemente, o vazamento do ar comprimido”. (VORPE; FILHO; FRANÇA, 1995, p.37). Vorpe, Filho e França (1995, p.37) afirmam que “o suprimento de ar comprimido para o disjuntor deve proporcionar um desempenho confiável durante toda sua vida. O ar deve ser altamente seco e sem contaminação”. Conclui-se assim que o disjuntor a ar comprimido deve ter manutenção periódica para garantir a qualidade de seu funcionamento.

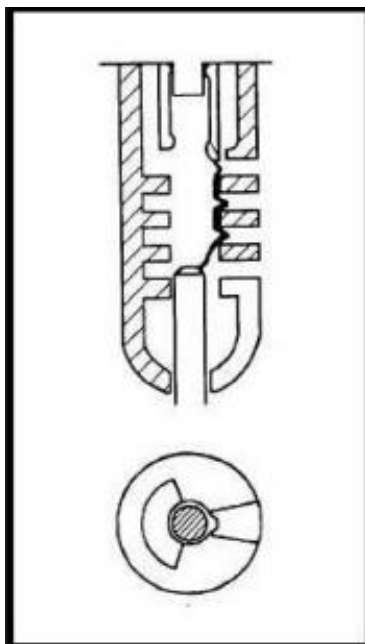
2.2.3.2 Disjuntores a óleo

Nesse tipo específico de disjuntor, os dispositivos de interrupção são submersos em óleo isolante. A extinção do arco elétrico ocorre devido à decomposição das moléculas de óleo causada pelas elevadas temperaturas geradas pela energia do arco. Esse processo resulta na produção de gases, principalmente o hidrogênio. A quantidade de gás liberado está diretamente relacionada à intensidade da corrente e à duração do arco (VORPE; FILHO; FRANÇA, 1995, p.31) e (MORAIS, 1985, p.189).

Para Vorpe, Filho e França (1995, p.31), “o aumento da pressão interna nas câmaras de interrupção cria um fluxo de óleo que irá deionizar o dielétrico, resfriar e alongar o arco”. O aumento da pressão em torno do arco determina “uma elevação do gradiente de tensão necessário à sua manutenção”. (MORAIS, 1985, p.189).

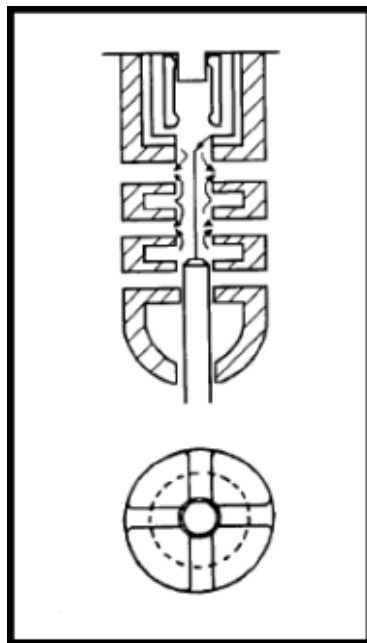
Nos disjuntores a óleo utilizam-se dois tipos de câmara de extinção, as câmaras de sopro transversal e as câmaras de sopro axial, conforme indicado nas figuras 1 e 2.

Figura 1 – Câmara de extinção de sopro transversal.



Fonte: Morais (1985, p.31)

Figura 2 – Câmara de extinção de sopro axial.



Fonte: Moraes (1985, p.31)

Moraes (1985, p.189) afirma que nas câmaras de sopro transversal, ao passo que o contato móvel vai se afastando do contato fixo, os gases liberados no interior da câmara aumentam a pressão interna e são obrigados a passar por aberturas para que a sobre pressão seja aliviada. O autor complementa, “o arco é forçado contra as paredes mais frias da câmara e posto em contato com o óleo mais frio, sofrendo ao mesmo tempo um alongamento”.

Existe um momento em que a liberação de energia cessa, ocorrendo quando a corrente atinge o valor zero. Esse ponto reduz a temperatura na coluna do arco elétrico e resulta na de ionização dos gases. “Isto permite um rápido aumento da suportabilidade dielétrica entre os contatos, prevenindo uma reignição do arco”. (MORAIS, 1985, p.189).

2.2.3.3 Disjuntores a hexafluoreto de enxofre (sf6)

Devido às suas propriedades como um isolante excepcional e sua capacidade de interromper eficazmente a corrente elétrica, o gás SF6 é empregado em dispositivos de alta tensão. Além disso, sua habilidade significativa de transferir calor e a baixa

temperatura de ionização conferem a esse gás características ideais para extinguir o arco elétrico.

O gás SF₆ possui outras características positivas, como ser auto regenerável, ou seja, após o arco ser extinto, não causa depósito de material condutor. É um gás eletronegativo, possui afinidade pela absorção de elétrons livres e isso acaba por retardar o restabelecimento súbito da corrente elétrica. (VORPE, FILHO E FRANÇA, 1995, p.37).

Outra boa qualidade do gás é ser extremamente estável e inerte, isso resulta em ótima estabilidade química para as temperaturas em que os óleos usados nos disjuntores começam a sofrer oxidação e decomposição. Quando ocorrem arcos elétricos, o gás sofre uma lenta decomposição, produzem fluoretos que “[...] recombina-se para formar produtos não tóxicos imediatamente após a extinção do arco”. (MORAIS, 1985, p.191).

Existem duas categorias de disjuntores para o gás SF₆: os disjuntores de pressão única e os disjuntores de pressão dupla.

2.2.3.4 Disjuntores de dupla pressão

Esses disjuntores apresentam uma elevada capacidade de interrupção e um tempo de interrupção reduzido. Para manter o gás a alta pressão, os disjuntores de dupla pressão possuem um compressor de gás localizado em um reservatório interno. Durante a formação do arco elétrico, ocorrida durante a interrupção, o gás contido nesse reservatório é direcionado para a região entre os contatos, no sistema de baixa pressão. Após a interrupção, a pressão é restabelecida pelo compressor de gás, que realiza a transferência do gás do sistema de baixa pressão para o sistema de alta pressão. Ressalta-se aqui que os disjuntores de dupla pressão atualmente não são tão utilizados quanto os disjuntores de única pressão.

Isso porque os disjuntores de dupla pressão possuíam compressores de gás com baixa confiabilidade “[...] e a tendência do hexafluoreto de enxofre a liquefazer-se à temperatura ambiente quando comprimido, [...] tornava necessário instalar aquecedores no reservatório de alta pressão [...]”. (MORAIS, 1985, p.191).

2.2.3.5 Disjuntores de única pressão

Nos disjuntores de única pressão a SF6, a pressão necessária para o sopro (extinção do arco) “[...] é produzida durante a operação de abertura do disjuntor por meio de um pistão solidário à haste do contato móvel que, ao movimentar-se, comprime o gás dentro de uma câmara”. (VORPE, FILHO E FRANÇA, 1995, p.38).

Por serem disjuntores de pressão única, eles dispensam o uso de um compressor de gás e não necessitam de aquecedores para prevenir a liquefação do hexafluoreto de enxofre. Essas características resultam em uma maior confiabilidade e custo mais baixo para o disjuntor SF6 de pressão única.

O polo do disjuntor de única pressão a SF6, segundo Vorpe, Filho e França (1995, p.38 e p.39), é composto por:

- Uma unidade de interrupção, composta por um contato fixo, um contato móvel operado por uma haste isolante, um pistão ou um cilindro soprador solidário e um bocal de sopro que faz a orientação do fluxo do gás na região entre os contatos;
- Um isolador que faz a isolação para a terra;
- Mecanismos de acionamento a mola do contato móvel, que podem ser pneumáticos ou hidráulicos.
- A alta capacidade de interrupção com mecanismo de operação de relativa baixa energia;
- O curto tempo de interrupção, equivalente a 2 ou 3 ciclos
- A interrupção de correntes capacitivas sem reacendimento do arco, devido às propriedades de extinção do gás hexafluoreto de enxofre.

“O desenvolvimento e a difusão dos disjuntores a SF8 estão ligados ao desenvolvimento das técnicas de selagem dos recipientes e de detecção de vazamentos de gás”. (MORAIS, 1985, p.192).

Em razão desses e de outros elementos, como a baixa exigência de manutenção, esses disjuntores tornam-se preferenciais em relação aos disjuntores a óleo e a ar comprimido no mercado.

2.3 SUPERAÇÃO DOS DISJUNTORES

A avaliação para determinar a capacidade de superação dos disjuntores compreende duas fases distintas. A primeira etapa envolve a revisão dos estudos de curto-circuito, nos quais são identificados os disjuntores potenciais para superação. A segunda fase compreende uma análise mais aprofundada dos disjuntores selecionados, levando em consideração os diversos métodos possíveis de superação.

- Corrente de carga;
- Corrente de curto-circuito simétrica;
- Corrente de curto-circuito assimétrica;
- Crista da corrente de curto-circuito;
- TRT (Tensão de restabelecimento transitória)

Neste trabalho, vamos focar na superação dos disjuntores através da TRT – Tensão de Restabelecimento Transitória.

2.4 SUPERAÇÃO POR TRT

A superação por TRT é caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade dielétrica ou térmica do meio de extinção do arco elétrico. O disjuntor pode ser considerado superado por amplitude ou por taxa de crescimento da TRT.

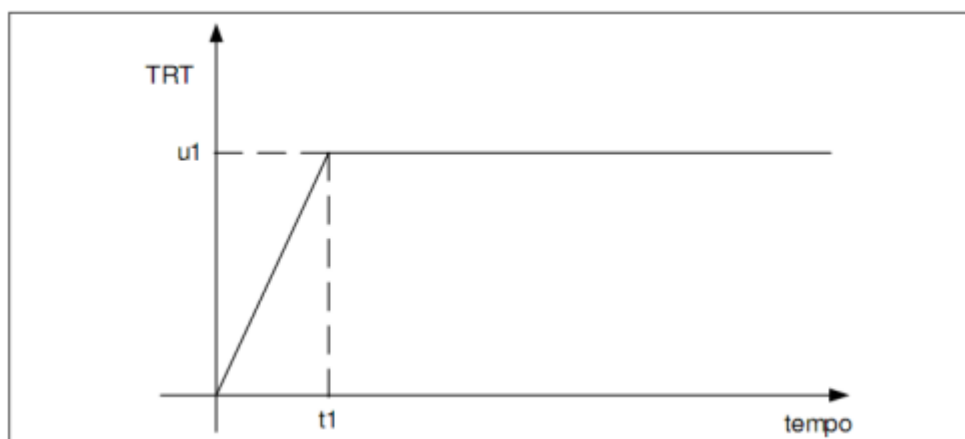
A superação por TRT só se aplica a disjuntores. Esta superação caracterizasse quando a tensão entre os contatos no momento da abertura do disjuntor for superior aos limites de suportabilidade dielétrica ou térmica do meio extintor de arco elétrico do disjuntor. (SINDER, 2007, p.34).

De acordo com Sinder (2007, p.34) para verificar a superação por TRT, o procedimento mais adotado consiste em comparar em um mesmo gráfico o oscilograma da TRT propriamente dita com a envoltória prevista nas normas IEC 62271-100 [10] e NBR 7118 [11] ou especificada pelo fabricante. O disjuntor é considerado superado por TRT quando o oscilograma ultrapassa a envoltória em algum ponto.

As envoltórias destas normas distinguem-se em dois modelos, uma envoltória a dois parâmetros que é utilizada para analisar disjuntores instalados em sistemas de até 100 kV, e envoltórias de quatro parâmetros para análise de disjuntores instalados em sistemas com tensão acima de 100 kV. Além da tensão do sistema, as envoltórias são obtidas pelo tipo de falta, fator de primeiro polo e o fator 81 de amplitude (fator este representado pela relação entre o máximo valor da TRT ao valor de crista da tensão nominal à frequência industrial) do sistema em questão. As figuras 3 e 4 representam exemplos de envoltórias de dois e quatro parâmetros respectivamente. (SINDER, 2007, p.35).

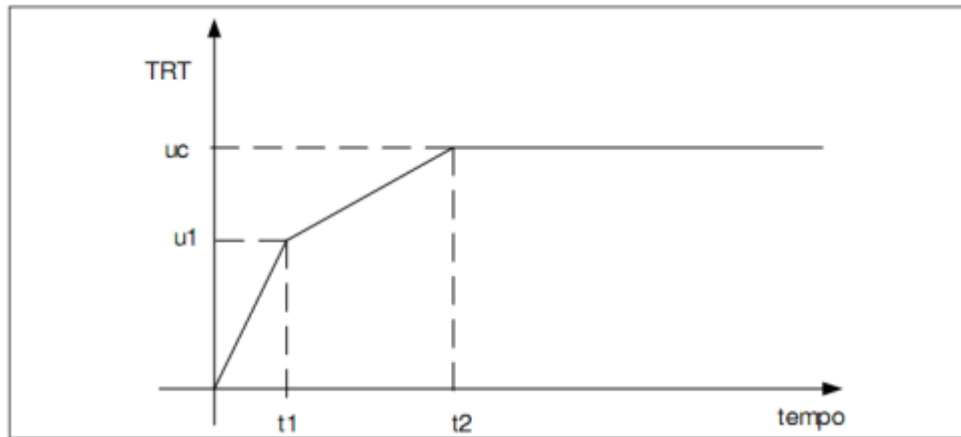
As figuras 5 e 6 representam exemplos de relações de TRT verificada com a envoltória de TRT especificada em norma para um disjuntor. Na figura 5, nota-se que o disjuntor não está superado por TRT, ao passo que na figura 6 há superação. (SINDER, 2007, p.35).

Figura 3 – Envoltória a dois parâmetros.



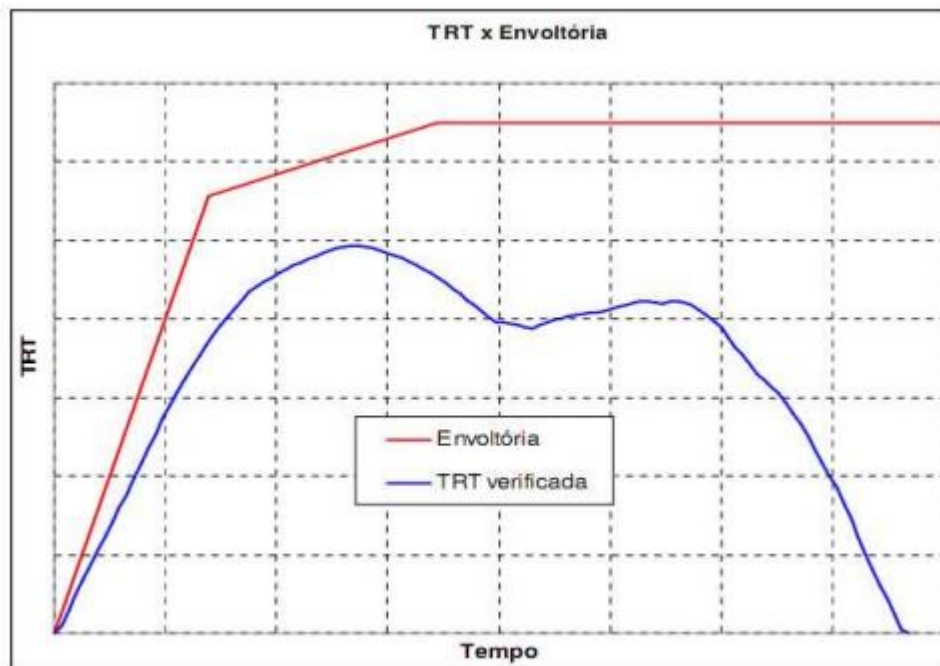
Fonte: Sinder (2007, p.35).

Figura 4 – Envoltória a quatro parâmetros.



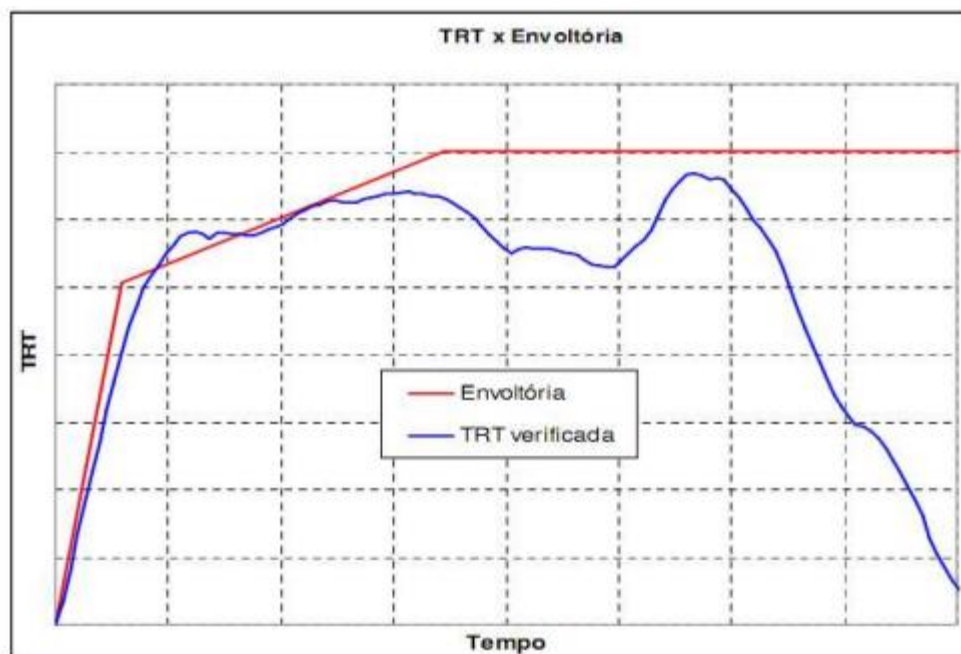
Fonte: Sinder (2007, p.36).

Figura 5 – Exemplo de disjuntor não superado por TRT.



Fonte: Sinder (2007, p.39).

Figura 6 – Exemplo de disjuntor superado por TRT.



Fonte: Sinder (2007, p.39).

A superação ocorre quando, em algum ponto, a curva resultante dos valores analisados ultrapassa a linha de referência da norma.

Conforme mencionado por Sinder (2007, p.34), em pesquisas sobre transitórios, são adotados métodos simplificados e conservadores, conforme detalhado no guia ANSI C37.0721-1971 "Application guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis". Contudo, para uma análise mais precisa e menos conservadora, são empregados métodos computacionais, como o uso de softwares de simulação de transitórios, que oferecem resultados mais precisos.

Para Sinder (2007, p.35), como visto na superação por corrente de curto-circuito, o valor de τ é influenciado pelas características do sistema elétrico que são afetadas pela expansão do sistema elétrico. Os efeitos da expansão do sistema elétrico acarretam um maior amortecimento das ondas refletidas pelas solicitações transitórias de manobra, amenizando as solicitações sobre os equipamentos, porém, a elevação dos níveis de curto-circuito intensifica a TRT sobre os disjuntores. Por consequência, a expansão do sistema impõe estudos de TRT e TCTR para que não superem os valores nominais dos disjuntores.

Conforme Amon F° (1987, p.342), a tensão de restabelecimento é descrita como a diferença de tensões medidas entre cada lado do disjuntor e a terra. O autor também afirma que a forma de onda da TRT possui, em sua magnitude inicial, componentes de frequências naturais e industriais. Essa onda inicial se propaga pelas linhas de transmissão conectadas à barra, partindo do terminal do disjuntor oposto à falha e refletindo em pontos de descontinuidade. Em seguida, ela retorna ao ponto de origem, onde se reflete novamente, somando-se à onda inicial.

Quando a falha ocorre próxima ao disjuntor (falha terminal), há uma maior severidade no valor de pico da TRT. Já em pontos mais distantes (falha quilométrica), as falhas contribuem para uma maior amplitude do pico da TCTR.

A parametrização da TRT é determinada pela rede e pelo local da falta.

2.4.1 Componentes de frequência industrial e natural

Para Amon F° (1987, p.341-342), a frequência natural da TRT é função da distância compreendida entre o local da falta e o disjuntor que irá atuar na isolação do sistema onde se encontra a falta. A frequência industrial é função do tipo de falta (trifásicas aterradas ou não, bifásicas aterradas ou não e monofásicas) e do grau de aterramento da rede (solidamente aterrada, efetivamente aterrada e isolada).

2.4.2 TRT – parâmetros

Durante o processo de interrupção da corrente de curto-circuito pelos contatos do disjuntor, é essencial que, ao ocorrer a extinção do arco, o agente extintor resfrie a câmara antes que haja qualquer reacendimento. Essa ação de resfriamento precisa ser mais ágil do que a taxa de crescimento da Tensão de Restabelecimento Transiente (TRT), a fim de evitar a re-ignição do arco, sendo a taxa de crescimento um dos parâmetros mais significativos da TRT.

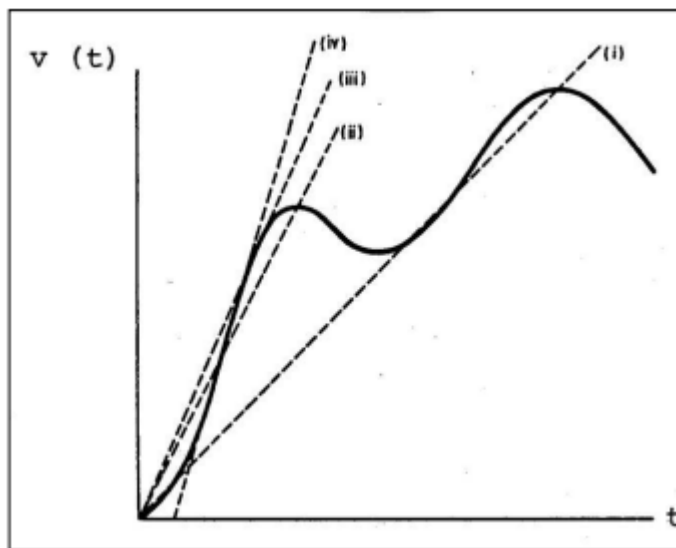
Outro parâmetro crucial é o pico atingido pela onda da TRT. Após a separação dos contatos do disjuntor e com a temperatura da câmara mantida moderada, o valor de pico da TRT não pode ultrapassar a capacidade dielétrica do agente extintor, pois, caso contrário, ocorre a ruptura do dielétrico do meio (AMON F°, 1987, p.342).

2.4.3 TCTR – taxa de crescimento da TRT

Segundo Colombo (1986, p. 33), a TCTR, expressa em $\text{kV}/\mu\text{s}$, entra em ação quando os contatos estão se separando, o que ocorre em um intervalo de tempo em torno de $100 \mu\text{s}$. Nesse momento, ela influencia o dielétrico do meio, que possui uma condutividade residual após a interrupção do arco elétrico. Essa influência busca promover a reignição de forma térmica entre os contatos, perdurando até o surgimento do primeiro pico da taxa de recuperação de tensão (TRT). Após esse ponto inicial, a TCTR não impacta tão intensamente nas demandas do disjuntor.

Dado que há uma diversidade significativa de formas de onda de taxa de recuperação de tensão (TRT), priorizam-se, para a avaliação do desempenho do disjuntor, os momentos cruciais representados pelo primeiro pico e pelo pico máximo. A TCTR, por sua vez, é caracterizada por quatro diferentes formas, ilustradas na figura 7.

Figura 7 – Taxa de crescimento da TRT.



Fonte: Amon Fº (1987, p.342).

- i) Taxa média de crescimento de zero ao pico máximo da TRT;
- ii) Taxa média de crescimento de zero ao primeiro pico da TRT

- iii) Máxima taxa média de crescimento, expressa como a tangente à curva da TRT passando pela origem;
- iv) Máximo valor instantâneo da TCTR.

Segundo Amon F° (1987, p. 351), “TCTR é função da corrente de curto-circuito que circula no polo do disjuntor antes de sua abertura, da frequência industrial e da impedância de surto equivalente vista dos terminais do polo aberto do disjuntor”.

A seguir encontra-se o Quadro 1 contendo a definição de superação por TRT.

Quadro 1 – Quadro resumo da superação por TRT.

Superação por TRT	A parametrização da TRT é determinada pela rede e pelo local da falta. Os valores de TRT e de TCTR, fornecidos por estudos de transitórios elétricos sob manobras de curto-circuito, devem ser comparados com as envoltórias de norma IEC 62271-100 e NBR 7118. As envoltórias destas normas distinguem-se em dois modelos, uma envoltória a dois parâmetros que é utilizada para analisar disjuntores instalados em sistemas de até 100 kV, e envoltórias de quatro parâmetros para análise de disjuntores instalados em sistemas com tensão acima de 100 kV. (SINDER, 2007, p.35).	Caracteriza-se quando a tensão entre os contatos no momento da abertura do disjuntor for superior aos limites de suportabilidade dielétrica ou térmica do meio extintor de arco elétrico do disjuntor. (SINDER, 2007, p.34). Esse tipo de superação pode ocorrer nos estágios 3 e 4 do sistema de interrupção de corrente.
-------------------	---	---

Fonte: Sinder (2007) e Rosas (2009).

3 METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA ADOTADA DA TRT PARA FALTAS TERMINAIS E QUILOMÉTRICAS

A análise de adequabilidade dos disjuntores, será feita considerando casos de estudos existentes de uma concessionária. Os estudos referem-se a análise de desempenho de disjuntores pertencentes a três subestações (C1, C2 e G1) interligadas por duas linhas de transmissão, pertencentes a mesma concessionária de energia.

Todas as simulações foram realizadas por meio do programa ATP (*Alternative Transients Program*), utilizando a interface gráfica ATPDraw versão 7.3.

Todo o sistema foi modelado com as informações dos bancos de dados do Sistema Interligado Nacional (SIN) disponibilizados pela ONS.

As envoltórias de suportabilidade dos disjuntores foram adotadas conforme norma IEC 62271-100.

A especificação por TRT consistirá na comparação entre a onda da TRT obtida da simulação com a envoltória normalizada, apresentada na norma IEC 62271-100. O disjuntor estará adequado se a envoltória do TRT encontrada no estudo for inferior à envoltória normalizada. A determinação das solicitações da TRT será feita buscando-se a condição mais crítica para o sistema, de modo que as condições de falta terminal e falta quilométrica possam ser consideradas de acordo com o local da instalação do disjuntor.

Os resultados apresentados deverão considerar as situações mais críticas para os disjuntores em questão e, com base na análise crítica dos resultados, será avaliada a adequabilidade dos disjuntores para operarem na rede de transmissão sob estudo.

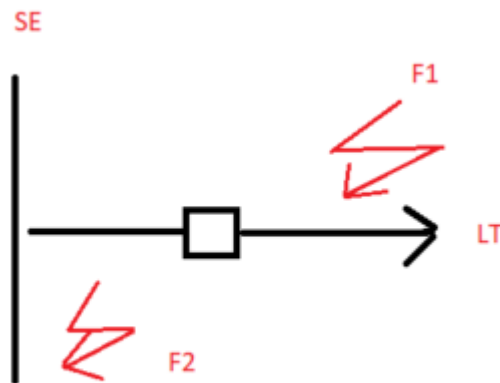
Para a avaliação de TRT para faltas terminais e quilométricas envolvendo a LT 345kV C1 – C2 e LT 345kV C1 – G1, exclusivamente para faltas terminais e quilométricas nos disjuntores de ambos os lados da transformação 345/138kV, as seguintes premissas são adotadas:

- Curto-circuito aplicado em regime permanente previamente à abertura de falta;
- Aplicação de defeitos trifásicos isolados, trifásicos aterrados e fase-terra;
- Faltas aplicadas nos dois terminais do disjuntor (linha e barra);
- Falta quilométrica fase-terra, trifásica aterrada e trifásica isolada;

- Ajustes dos casos com faltas monofásicas para que o polo do disjuntor referente à fase sob falta (fase A) seja o último a abrir;

De forma esquemática, a figura 8 apresenta os locais de aplicação das faltas para análises de curtos-circuitos terminais.

Figura 8 – Aplicação de faltas nos terminais de linha (F1) e barra (F2).



Fonte: Elaborado pelo autor

Para faltas quilométricas, as faltas monofásicas foram aplicadas, trifásicas isoladas e trifásicas aterradas a determinadas distâncias do disjuntor a ser instalado nos terminais.

Para faltas quilométricas, a envoltória considerada para análise foi L60% e L30% (60% e 30% da capacidade do disjuntor) por ser a que mais reflete a condição de curto-circuito da linha em análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CASO 1

Neste caso serão apresentados, através de figuras e tabelas, os resultados das TRT e TCTRT para as situações de abertura de faltas terminais de acordo com o tipo de falta e localização, para a avaliação técnica dos disjuntores dos terminais de linha na subestação.

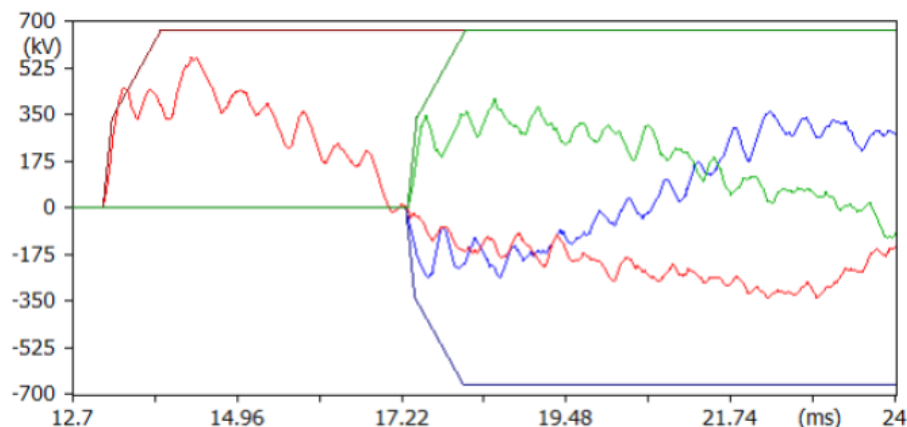
A Tabela 2 apresenta os valores da avaliação realizada, para faltas aplicadas no lado da linha e da barra geral, na SE C1, para o disjuntor de um dos circuitos da LT 345kV C1 – C2.

Tabela 2 – TRT e TCTRT máxima abertura de faltas terminais – terminal LT 345kV.

Falta	Local	Tipo	Corrente de falta através do disjuntor		Sequência de abertura	TRT máx		TCRT máx	
			(kA eficaz)	(%)		Fase	kV	Fase	kV/μs
CASO 1	LT	3F	24.5	48.9	BAC	B	561.1	A	1.6

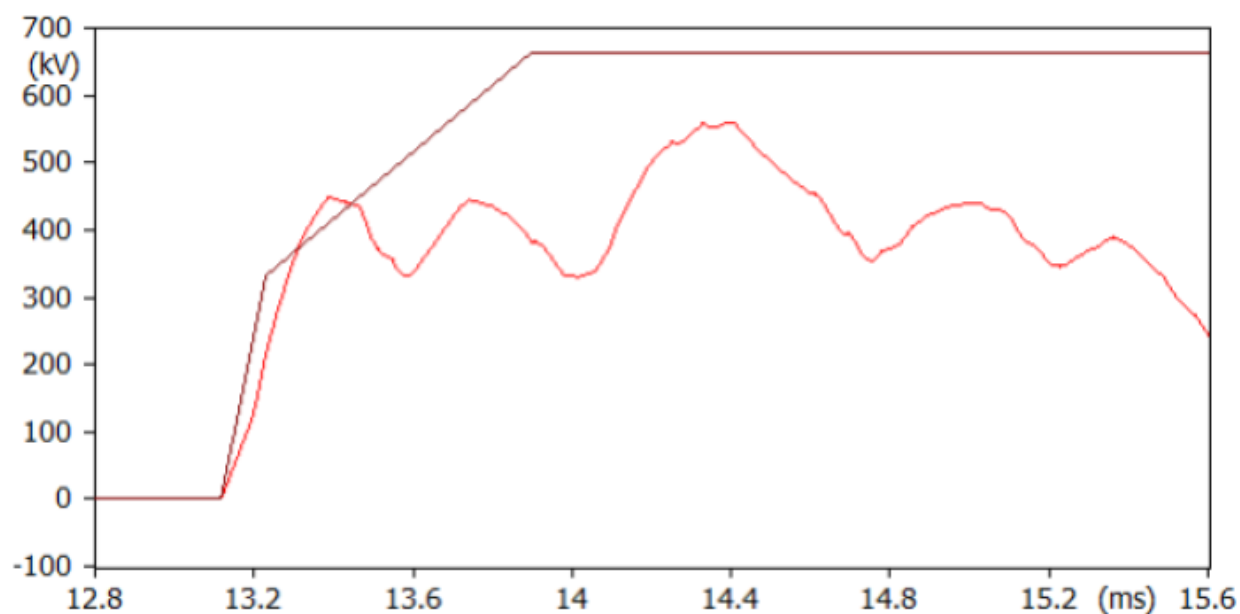
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória T60 com fator de 1º polo 1,5.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória T60 com fator de 1º polo 1,5.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para comprovar a suportabilidade do equipamento para o caso 1, foi comparado a sequência de estudo com a TRT interpolada T38,89% da capacidade de interrupção nominal do equipamento – disjuntor 420kV, 63kA, $k_{pp} = 1,3$ (ensaiado conforme norma IEC 62271-100).

Logo, podemos concluir que a TRT para T38,89% do caso 1 do estudo está dentro dos valores da norma e que a fornecedora de equipamentos garante a suportabilidade do disjuntor para as condições apresentadas.

Na Tabela 3 é possível visualizar os dados que comprovam a suportabilidade do disjuntor para as condições apresentadas.

Tabela 3 – Dados comparativos para o caso 1.

	Caso 1	T30%	Interpolação	T60%
I (kAef)	24.5	18.9	24.5	37.8
U1 (kVp)	-	-	582.4	334
t1 (μs)	-	-	132.1	111
Uc (kVp)	561.1	687	681.4	668
t2, t3 (μs)	350.68	137	293.7	666
U1/t1 (kV/μs)	1.6	5	4.4	3

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 CASO 2 e 3

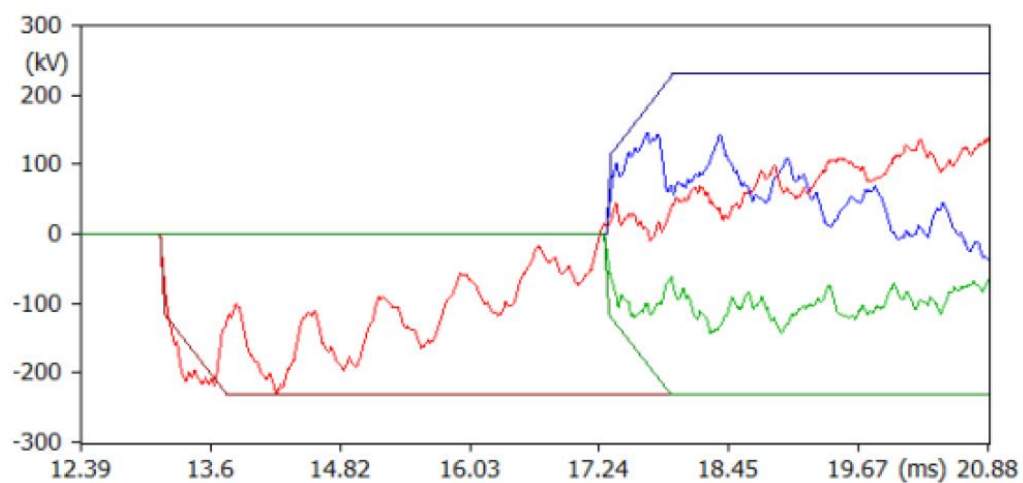
Na Tabela 4, a seguir, serão apresentados os resultados para a faltas aplicadas no lado da linha e da barra geral, na SE C1, para o disjuntor de um dos circuitos das LD 138kV C1 – Transmissora.

Tabela 4 – TRT e TCRT máxima abertura de faltas terminais – terminal LD para transmissora.

Falta	Local	Tipo	Corrente de falta através do disjuntor		Sequência de abertura	TRT máx		TCRT máx	
			(kA eficaz)	(%)		Fase	kV	Fase	kV/μs
CASO 2	LINHA	3F	10.3	32.8	BCA	B	229.6	B	1.881
CASO 3	BARRA	3F	4.4	13.9	BAC	B	268.9	B	1.301

Fonte: Elaborado pelo autor

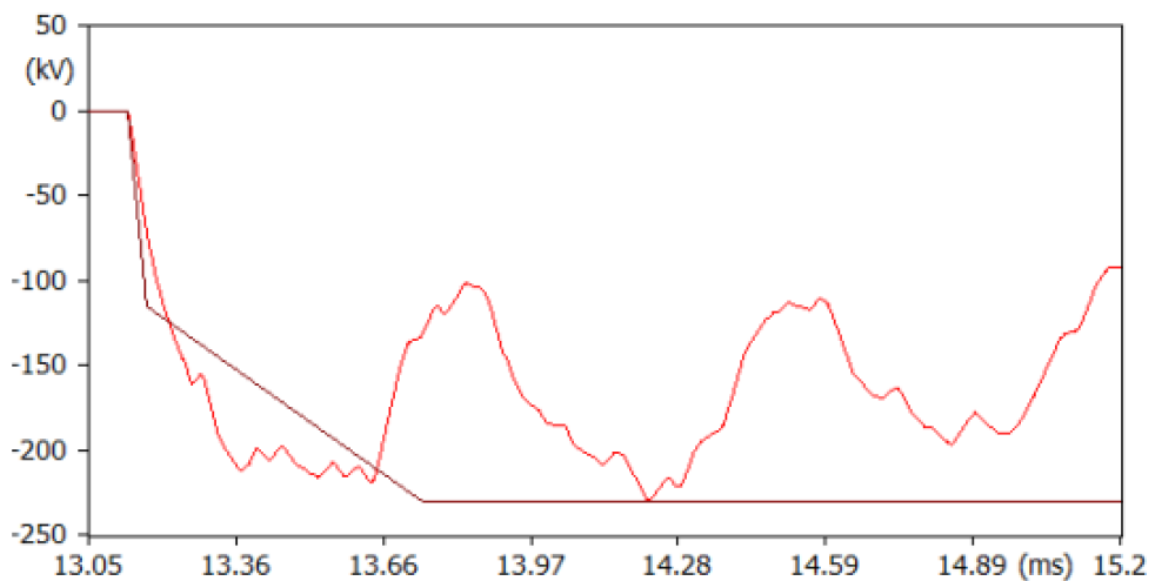
Figura 11 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória para T60 com fator de 1º polo 1,3 (CASO 2).



Fonte:

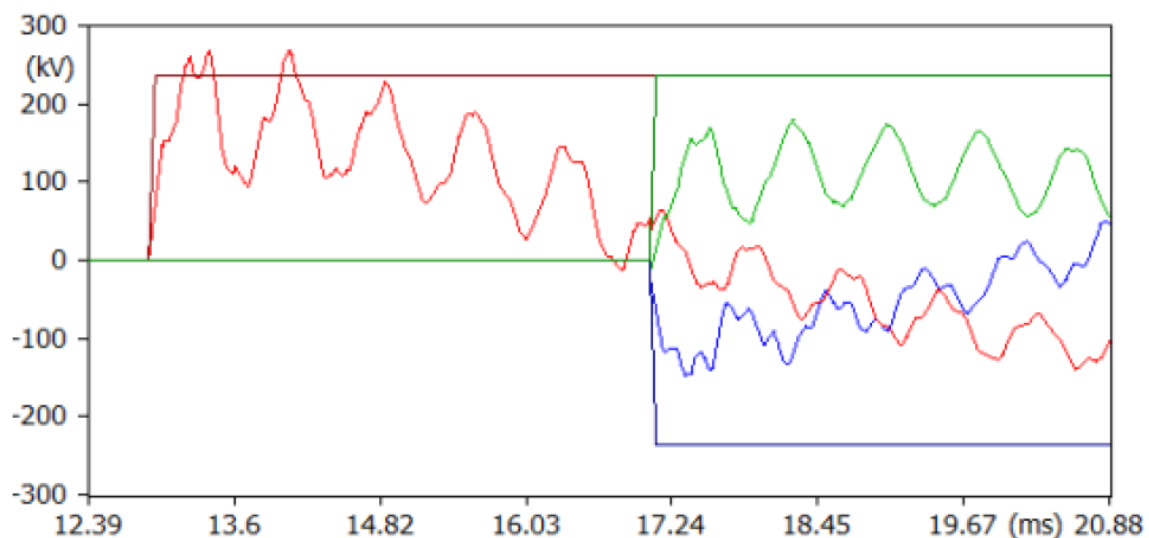
Elaborado pelo autor

Figura 12 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica, fase B com valores máximos de TRT de 229,6kV e de TCTRT de 1,881 kV/ μ s (CASO 2).



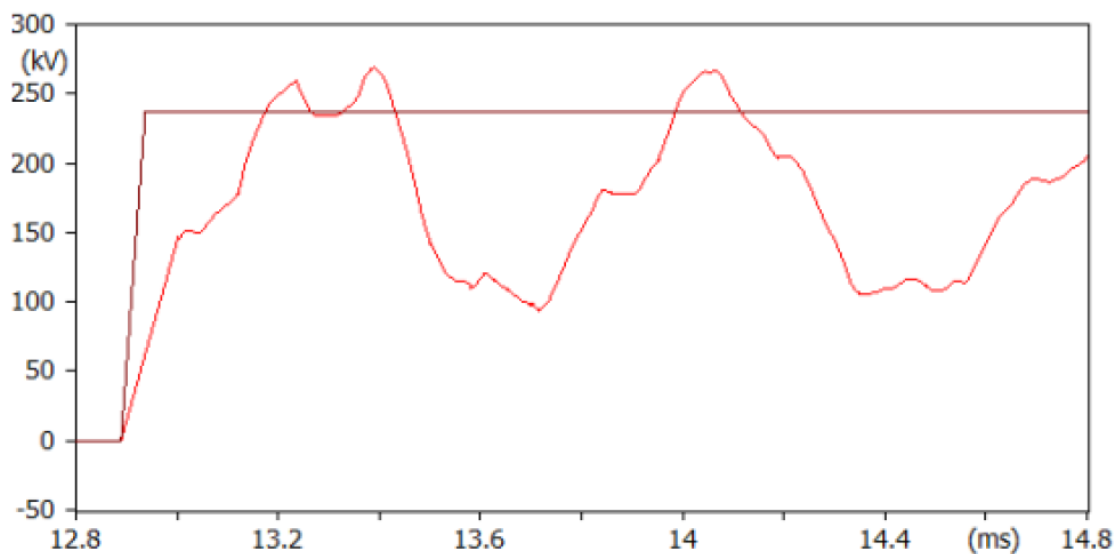
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória para T30 com fator de 1º polo 1,3 (CASO 3).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica, fase B com valores máximos de TRT de 268,9kV e TCTRT de 1,301kV/μs. Envoltória para T30 (CASO 3).



Fonte: Elaborado pelo autor

Para os casos 2 e 3 (Tabela 4), utilizamos uma envoltória de sequência T30% da capacidade de interrupção nominal do equipamento –disjuntor 145kV, 40kA, kpp = 1,5 (conforme norma IEC 62271-100).

Logo, podemos concluir que as sequências de estudo estão cobertas pela envoltória apresentada, conforme dados da Tabela 5.

Tabela 5 – Dados comparativos para o caso 2 e 3.

	Caso 2 (tabela 4)	Caso 3 (tabela 4)	T30%
I (kAef)	10.3	4.4	12
Uc (kVp)	229.6	268.9	273
t2, t3 (μs)	122.06	206.68	55
Uc/t3 (kV/μs)	1.881	1.301	5

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 CASO 4

Neste caso, serão apresentados os resultados para avaliação do disjuntor no setor de 138kV, responsável pela operação de um transformador 345/138kV.

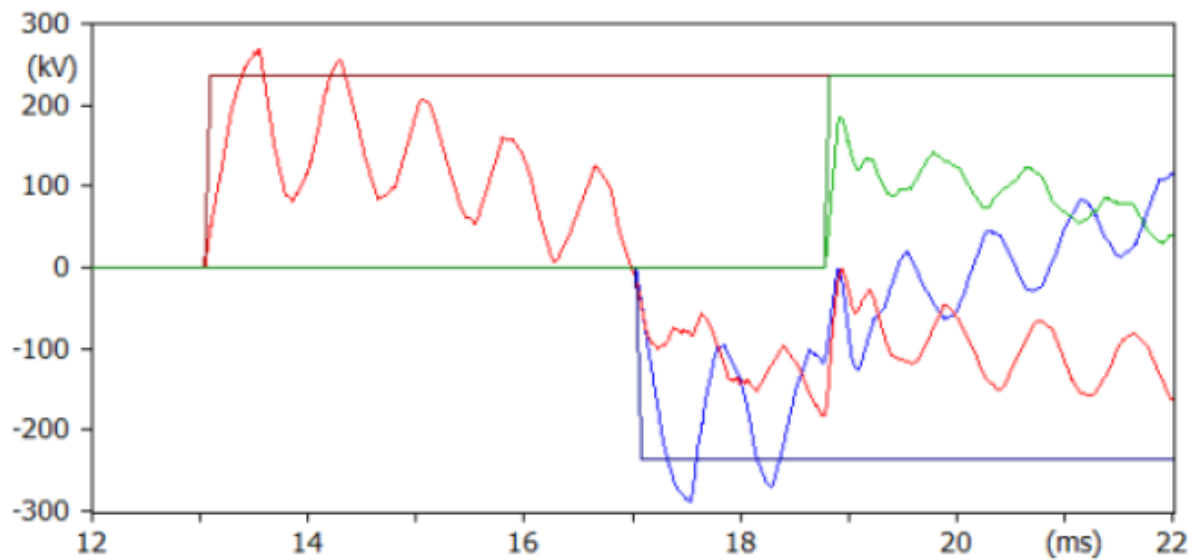
A Tabela 6 apresenta os valores relativos à avaliação para as faltas aplicadas no disjuntor do setor 138kV da SE C1.

Tabela 6 – TRT e TCRT máxima abertura de faltas terminais – disjuntor 145kV.

Falta	Local	Tipo	Corrente de falta através do disjuntor		Sequência de abertura	TRT máx		TCRT máx	
			(kA eficaz)	(%)		Fase	kV	Fase	kV/μs
CASO 4	TRANSFOR-	3F	6.9	22	BAC	A	288.5	A	0.572

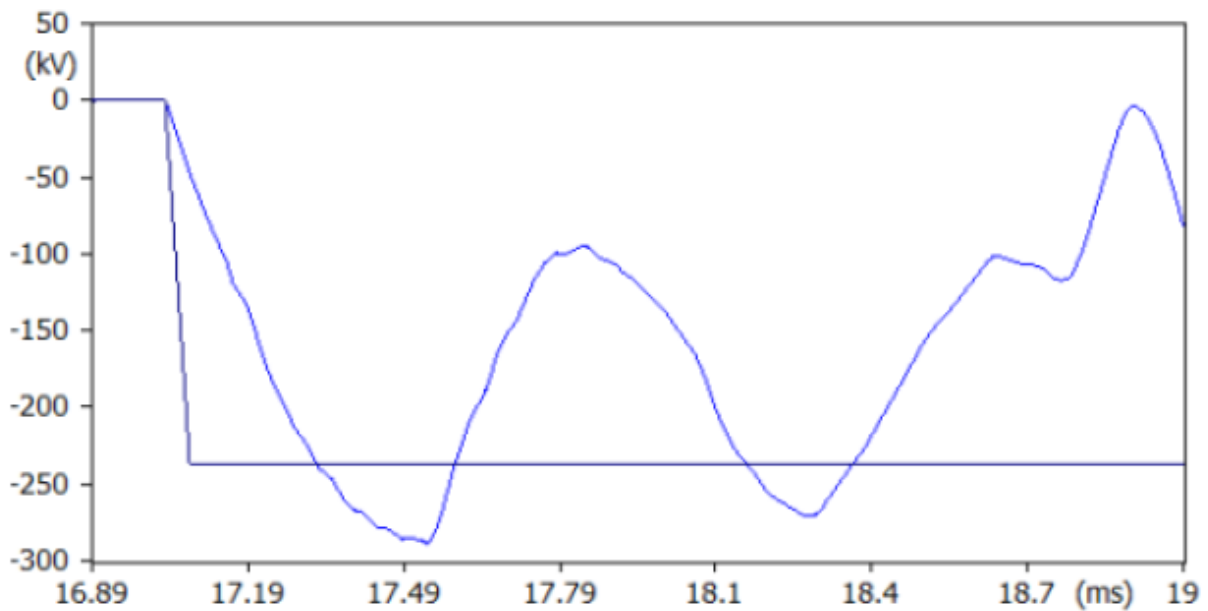
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica com envoltória para T30 com fator de 1º polo 1,3.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16 – SE C1 – TRT na interrupção de falta trifásica, fase A com valores máximos de TRT de 288,5kV e TCTRT de 0,572kV/ μ s. Envoltória T30 com fator de 1º polo 1,3.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o caso 4 (Tabela 6), utilizamos o ensaio de manobra em discordância de fases OP2 realizado no disjuntor 145kV, 40kA, kpp = 1.5, conforme norma IEC 62271-100, portanto, podemos concluir que a sequência de estudo está coberta pela envoltória apresentada, conforme mostra os dados da Tabela 7

Tabela 7 – Dados comparativos para o caso 4.

	Caso 4 (tabela 6)	ENSAIO OP2
I (kAef)	6.9	10
U1 (kVp)	-	271
t1 (µs)	-	155
Uc (kVp)	288.5	381
t2, t3 (µs)	504.37	517
U1/t1 (kV/µs)	0.572	1.75

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 CASO 5

Neste item serão apresentados, através de tabelas e figuras, os resultados das TRT e TCTRT para as situações de aberturas de faltas quilométricas de acordo com o tipo de falta e localização, para avaliação dos disjuntores dos terminais de linhas na SE C1.

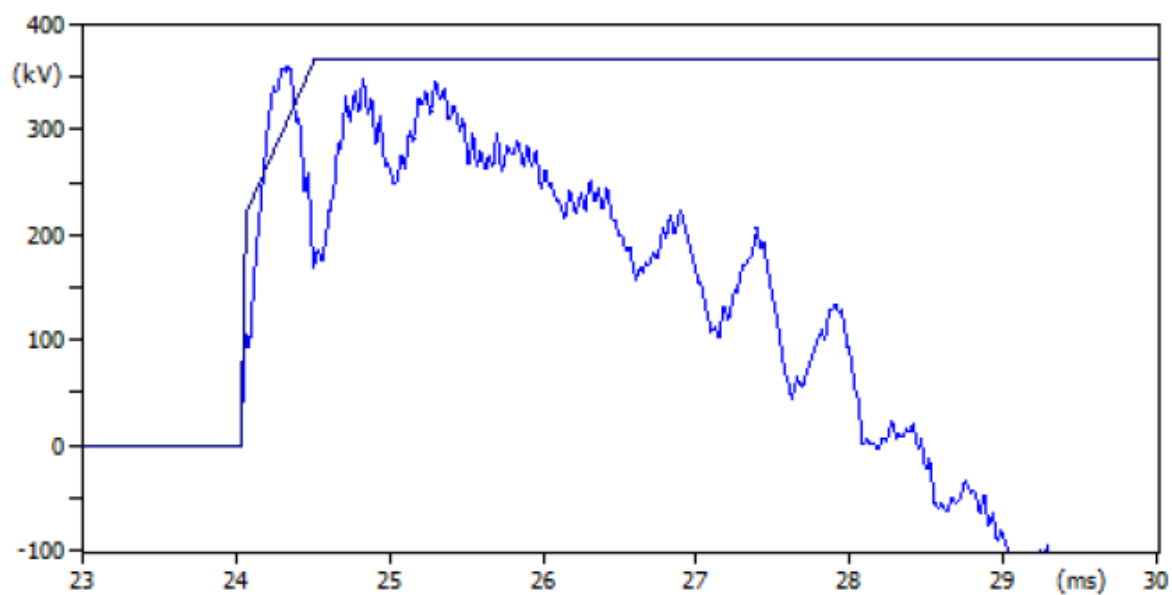
A tabela 8 apresenta os valores relativos à avaliação realizadas, para faltas do tipo quilométricas.

Tabela 8 – TRT e TCTRT para abertura de faltas quilométricas – terminal LT 345kV.

Falta	Local	Tipo	Corrente de falta através do disjuntor		Sequência de abertura	TRT máx		TCRT máx	
			(kA eficaz)	(%)		Fase	kV	Fase	kV/µs
CASO 5	LT	FT	18.1	36.1	CBA	A	359.4	A	3.496

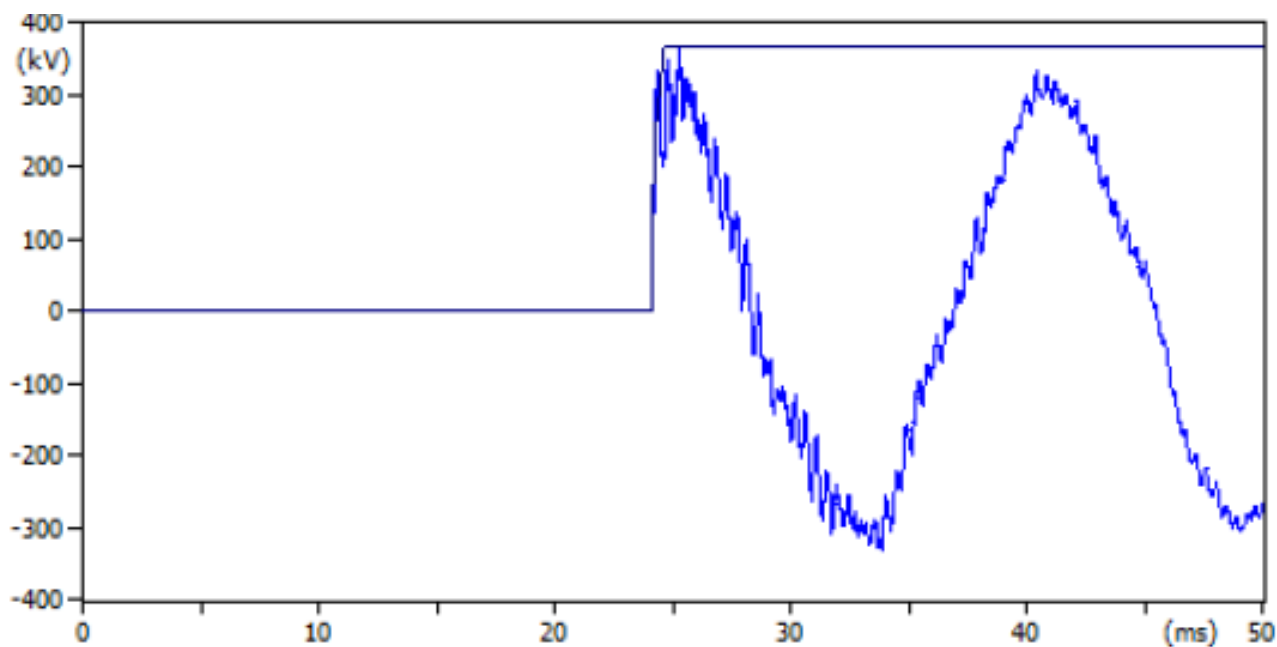
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 – SE C1 – TRT na interrupção de falta monofásica na LT. Fase A com valor máximo de TRT de 359,4kV e TCTRT de 3,496kV/μs. Envoltória para L60.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 – Detalhe da figura 17.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o caso 5 (Tabela 8), utilizamos uma envoltória de sequência T30% da capacidade de interrupção nominal do equipamento – disjuntor 420kV, 63kA, kpp = 1,3 (conforme norma IEC 62271-100).

Logo, podemos concluir que a sequência de estudo está coberta pela envoltória apresentada, conforme mostra dados comparativos da tabela 9.

Tabela 9 – Dados comparativos – CASO 5

	Caso 5 (tabela 8)	T30%
I (kAef)	18.1	18.9
Uc (kVp)	359.4	687
t2, t3 (µs)	102.8	137
Uc/t3 (kV/µs)	3.496	5

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 CASO 6

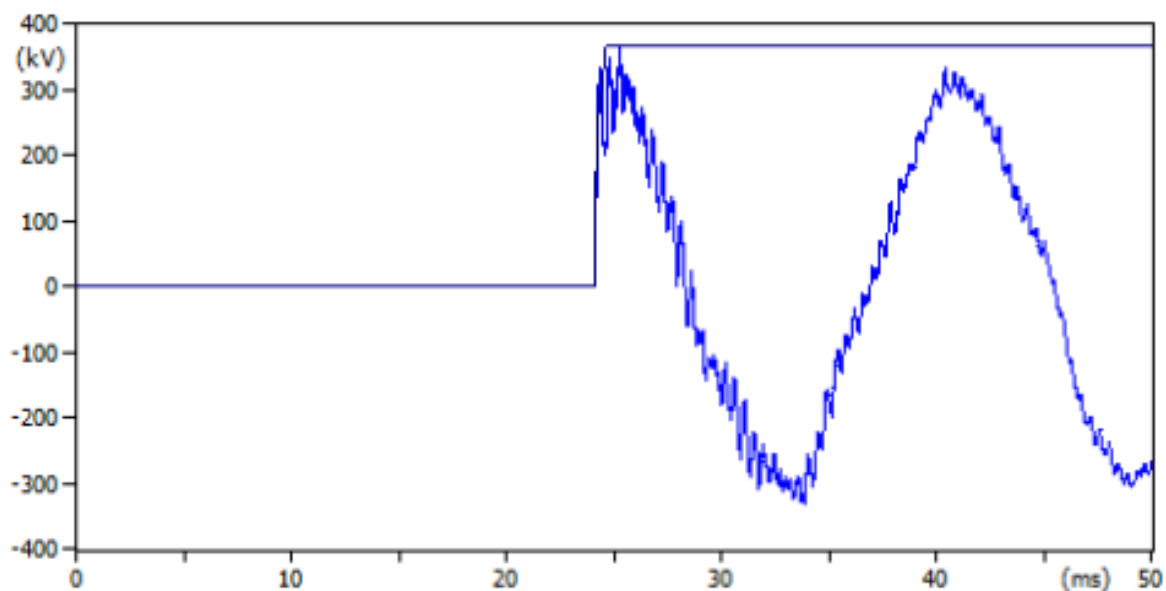
A Tabela 10 apresenta os cálculos relativos à avaliação realizada para o disjuntor da SE C1, para o disjuntor de um dos circuitos das LT 345kV SE C1 – G1.

Tabela 10 – TRT e TCRT para abertura de faltas quilométricas – terminal LT 345kV para G1.

Falta	Local	Tipo	Corrente de falta através do disjuntor		Sequência de abertura	TRT máx		TCRT máx	
			(kA eficaz)	(%)		Fase	kV	Fase	kV/µs
CASO 6	LT	FT	19.2	38.5	BCA	A	360.6	A	4.275

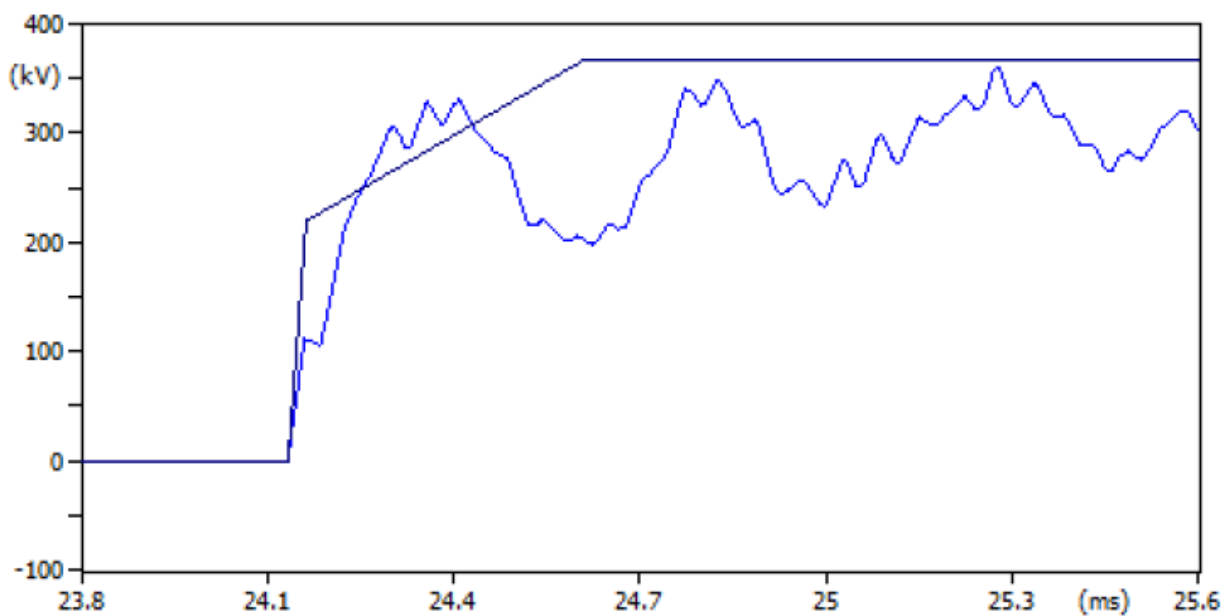
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – SE C1 – TRT na interrupção de falta monofásica na LT, fase A com valor máximo de TRT de 360,6kV e TCTRT de 4,275k kV/μs. Envoltória para L60.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Detalhe da figura 19.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o caso 6 (Tabela 10), utilizamos uma envoltória de sequência T30% da capacidade de interrupção nominal do equipamento – disjuntor 420kV, 63kA, kpp = 1,3 (conforme norma IEC 62271-100). Considerando que a corrente do caso está 1,58% maior do que a ensaiada, este valor está dentro da precisão de medição do laboratório (3%), portanto T30% atende o solicitado.

Logo, concluímos que a sequência de estudo está coberta pela envoltória apresentada. Segue dados comparativos na tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Dados comparativos – CASO 6.

	Caso 6 (tabela 10)	T30%
I (kAef)	19.2	18.9
Uc (kVp)	360.6	687
t2, t3 (µs)	84.35	137
Uc/t3 (kV/µs)	4.275	5

Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 – RESUMO DOS CASOS

A Tabela 12 ilustra o resumo das soluções obtidas de todos os casos.

Tabela 12 – Resultados obtidos a partir das simulações.

Falta	Local	Tipo	Corrente de falta através do disjuntor		Sequência de abertura	TRT máx		TCRT máx		Figuras
			(kA eficaz)	(%)		Fase	kV	Fase	kV/µs	
CASO 1	LT	3F	24.5	48.9	BAC	B	561.1	A	1.6	9 e 10
CASO 2	LINHA	3F	10.3	32.8	BCA	B	229.6	B	1.881	11 e 12
CASO 3	BARRA	3F	4.4	13.9	BAC	B	268.9	B	1.301	13 e 14
CASO 4	TRAFO	3F	6.9	22	BAC	A	288.5	A	0.572	15 e 16
CASO 5	LT	FT	18.1	36.1	CBA	A	359.4	A	3.496	17 e 18
CASO 6	LT	FT	19.2	38.5	BCA	A	360.6	A	4.275	19 e 20

Fonte: Elaborado pelo autor

- CASO 1 - Para comprovar a suportabilidade do equipamento, comparamos a sequência de estudo com a TRT interpolada T38,89% da capacidade de interrupção nominal do equipamento. A TRT analisada está dentro dos valores de norma garantindo a suportabilidade do disjuntor para as condições apresentadas.
- CASO 2 e 3 – Para comprovar a suportabilidade do equipamento, utilizamos uma envoltória de sequência T30% da capacidade de interrupção nominal do equipamento. As sequências de estudo analisadas estão cobertas pela envoltória, garantindo a suportabilidade do disjuntor para as condições apresentadas.
- CASO 4 – Para este caso, utilizamos o ensaio de manobra em discordância de fases OP2, conforme norma IEC 62271-100. A sequência de estudo está coberta pela envoltória garantindo a suportabilidade do disjuntor para as condições apresentadas.
- CASO 5 - Para este caso, utilizamos uma envoltória de sequência T30% da capacidade de interrupção nominal do equipamento. A sequência de estudo está coberta pela envoltória garantindo a suportabilidade do disjuntor para as condições apresentadas.
- CASO 6 – Utilizamos uma envoltória de sequência T30% da capacidade de interrupção nominal do equipamento. Considerando que a corrente do caso está 1,58% maior que a ensaiada, este valor está dentro da precisão de medição do laboratório (3%), portanto T30% atende o solicitado. A sequência de estudo está coberta pela envoltória apresentada.

5 – CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos a partir das simulações realizadas através do software ATP, conforme Tabela 12, observa-se a importância dos estudos relativos à análise paramétrica e de sensibilidade para correta avaliação das solicitações transitórias, as quais o sistema elétrico pode ser submetido devido à TRT.

Foi realizada a fundamentação teórica acerca do fenômeno transitório da TRT e da obtenção dos parâmetros a serem utilizados na modelagem do sistema a ser estudado. A partir das análises de sensibilidades e paramétricas realizadas, o diagnóstico de disjuntores quanto às solicitações de Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) foi obtido a partir das análises das simulações para cada caso, sendo eles em abertura de faltas quilométricas e aberturas de faltas terminais.

Para os casos analisados conforme a Tabela 12, podemos concluir que todos os casos a sequência dos estudos estavam cobertos pela envoltória, conforme norma IEC 62271-100, desta maneira obtendo resultados satisfatórios para os casos estudados.

Desta forma, a fornecedora dos equipamentos para esses empreendimentos, garante a suportabilidade e aplicabilidade dos disjuntores para todos os casos estudados.

REFERÊNCIAS

AMON FILHO, Jorge. Equipamentos elétricos – especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro: Furnas, 1985.

AMON FILHO, Jorge. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento – aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro, Furnas, Niterói, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.

AMON FILHO, Jorge. Tensão de Restabelecimento Transitória de Disjuntores – Metodologia de Estudo. 1986. 187f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1986.

VORPE, Michel A.; FILHO, Oscar K.; FRANÇA, Wilson J. Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência. Niterói: EDUFF, 1995.

MORAIS, Sérgio A. Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestação de Alta Tensão. Rio de Janeiro: Furnas, 1985.

IEC 62271-100 2017-06, Edition 2.2 – High-voltage switchgear and control gear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers.

IEEE Std C37.011-2019 – Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage above 1000 V.

GREENWOOD, A., Electrical Transients in Power Systems, 4ª edição. John Wiley & Sons, Wiley-Interscience, 1991.

Froton, Sergio. O.; Equipamentos de alta tensão: Prospeção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 1 ed. Brasília, Tiragem 2.000 livros, 2013

WILLIS; H. LEE.; ABB.Inc (org.). Power Distribution Planning Reference Book. 2.ed. Raleigh, North Carolina: Editora Marcel Dekker,Inc, 2004