

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

JONAS HALEPLIAN PIRES JÚNIOR

**Cálculo da tensão de restabelecimento transitória no domínio da
frequência**

São Paulo

2021

JONAS HALEPLIAN PIRES JÚNIOR

**Cálculo da tensão de restabelecimento transitória no domínio da
frequência**

Versão Corrigida.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração: Sistemas de potência

Orientador: Luiz Cera Zanetta Junior

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 03 de maio de 2021

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Junior, Jonas Haleplian

Cálculo da tensão de restabelecimento transitória no domínio da frequência / J. H. Junior – versão corr. – São Paulo, 2021.
103 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.SISTEMAS ELETRICOS DE POTENCIA 3.ANALISE DE TRANSITORIOS ELETROMAGNETICOS I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Cálculo da TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA NO DOMÍNIO DA
FREQUÊNCIA

Dissertação apresentada como exigência para obtenção
do grau de Mestrado em Engenharia Elétrica da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Aprovado em: _____

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

*The fear of the LORD is the beginning of knowledge:
but, fools despise wisdom and instruction. - Proverbs 1.7 Holy Bible*

Squeeze knowledge and taste wisdom's nectar! - Author

DEDICATÓRIA

Este trabalho, como um projeto de vida, dedico à minha companheira e esposa Prof^a. Débora Padilha Pires que, com paciência me apoiou durante esta fase crítica de nossa vida, quando preciosos momentos de convivência eram convertidos em jornadas de estudo e pesquisa, “massa crítica” indispensável para a formação de espíritos realizadores.

Também à minha irmã Dr^a. Sônia Pires Ramos a principal incentivadora desta árdua tarefa de conquistar um novo paradigma, o nobre sacerdócio multiplicador do conhecimento humano.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus que tem me capacitado para as conquistas e me fortalecido nos momentos difíceis.

À minha querida mãe Sarah Haleplian Pires, que do alto de seus noventa e quatro anos de idade inspira a todos quantos questionam os motivos de sua inabalável fé. Ela é a nossa grande referência do viver coerente com princípios absolutos muito em descrédito na sociedade pós-moderna. Ao meu pai Jonas de Abreu Pires, de saudosa memória, homem bom, sereno e íntegro que deixou muitos exemplos por onde passou, ficaria muito orgulhoso pelo meu sucesso.

Aos meus filhos Tânia, Taís e Túlio com esposos, esposa e meus sete netos que representam o grande motivo de alegria em nossa vida; estes nos permitem dizer que “valeu a pena” todo o esforço empregado.

Ao meu irmão Pr. Jair Haleplian Pires que com incentivo e verdadeiro suporte material e espiritual, representa uma das firmes colunas do meu projeto de vida. À minha irmã Débora H.P. do Nascimento pelos conselhos e apoio ensejados. A todos os meus parentes que se alegram neste momento, pois contribuíram com palavras de ânimo e também por suas preces.

Ao Prof. Dr. José Roberto Castilho Piqueira que, pelo incentivo direto e admoestações pertinentes, descortinaram as expectativas já desgastadas pelo tempo, da possibilidade de participar do certame para ingresso ao PPGEE-EP-USP.

Ao Prof. Dr. Luiz Cera Zanetta Junior, meu orientador, que com muita paciência tem acompanhado os meus passos, muitos deles inseguros, pela distância que me separava da convivência acadêmica, e transmitido conhecimento da matéria, produto que lhe sobeja; enfim a todos os professores e colegas que me apoiaram durante as vezes que eles foram interceptados em seus afazeres de rotina.

RESUMO

HALEPLIAN PIRES JUNIOR, JONAS. Cálculo da tensão de restabelecimento transitória no domínio da frequência. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Potência. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2021.

Este trabalho de dissertação foi elaborado com a finalidade de apresentar um método alternativo para a análise da tensão de restabelecimento transitória (TRT) no momento de abertura dos disjuntores durante a ocorrência de faltas nos sistemas de potência; a operação adequada de um disjuntor por longos períodos na rede depende do seu correto dimensionamento e correspondente especificação que, é também função do levantamento preciso da TRT, além de outras informações pertinentes. O método proposto de avaliação da TRT é através de cálculos numéricos executados no domínio da frequência com boa precisão, o que deixa claro ser essa opção comparável ao uso dos programas tradicionais de cálculo de transitórios eletromagnéticos. Os casos tratados são simulações de curto-circuito monofásico, bifásico isolado, bifásico com terra, trifásico isolado e trifásico com terra, em uma barra de subestação de uma rede de transmissão de energia elétrica utilizada como modelo de caso, idealizada para servir de base para a demonstração da aplicação do método apresentado. Oferecem-se informações relevantes adicionais para mostrar o contexto onde o estudo da TRT é utilizado, servindo como material de apoio para a elaboração das especificações dos disjuntores. Através de uma análise das principais faltas elétricas mais frequentes nas redes de energia elétrica, mostra-se a importância de uma especificação precisa do equipamento a ser utilizado; isso para contribuir com o fornecimento da energia elétrica com a maior qualidade que a tecnologia pode propiciar no momento da concepção de um projeto ou de sua ampliação.

Palavras-chave: Tensão de Restabelecimento Transitória. Transitórios Eletromagnéticos. Curto-circuito. Faltas Monofásicas Bifásicas e Trifásicas com ou sem Terra. Especificação de Disjuntores. Disjuntores de Alta Tensão. Superação de Equipamento Elétrico.

ABSTRACT

HALEPLIAN PIRES JUNIOR, JONAS. Transient Recovery Voltage in Frequency Domain Calculation. Monograph (Master Degree in Power Systems) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2021.

The purpose of this monograph work is to present an alternative method for the transient recovery voltage (TRV) analysis at the instant of circuit breakers opening, during the fault occurrences in power systems; the proper operation of a circuit breaker for long periods in the net, depends on its correct sizing and corresponding specification, which is also a function of an accurate TRV data survey, besides other important information. This proposed method of TRV evaluation is through the use of numerical calculations, performed in the frequency domain with good precision results; thus, the calculation shows comparability to the use of traditional programs for electromagnetic transient analysis. The short-circuit cases treated here are: Phase-to-Earth, Phase-to-Phase clear of ground, Phase-to-Phase-to-Earth and Three-Phase with or without earth faults - five simulation cases in a substation bar of an electric power transmission network created as a case model for demonstrating the application of proposed method. Additional relevant information is offered to show the TRV study context, providing material for circuit breaker specifications. Through the main most frequent electrical faults in electric power networks analysis, the importance of a precise specification of equipment to be used is shown; this to contribute to the best quality level of electrical power delivery provided by technology when designing or expanding an electrical power system project.

Keywords: Transient Recovery Voltage. Electromagnetic Transients. Short-Circuits. Single-phase faults. Two-phase faults with and without earth. Three-phase faults with and without earth. Circuit Breaker Specifications. High Voltage Breakers. Electrical Equipment Overrating.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- A INTERRUPÇÃO DA CORRENTE E FASES DA EXTINÇÃO DO ARCO	21
FIGURA 2- CÂMARA DE EXTINÇÃO SF6 – PRESSÃO ÚNICA.....	24
FIGURA 3- DISJUNTORES SF6	24
FIGURA 4- EVOLUÇÃO DA CORRENTE ASSIMÉTRICA DE CURTO-CIRCUITO (IF) AO LONGO DO TEMPO, COM INDICAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS	26
FIGURA 5- CURVA DE QUATRO PARÂMETROS IEC.....	38
FIGURA 6– RELAÇÃO ENTRE AS ENVOLTÓRIAS DA TRT E DA TRTI	40
FIGURA 7- ESBOÇOS DE APLICAÇÃO DOS CURTOS-CIRCUITOS.....	46
FIGURA 8 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO ISOLADO NA BARRA.....	47
FIGURA 9- CIRCUITO EQUIV. SIMPLIF. DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO ISOLADO NA BARRA	48
FIGURA 10 - PARTE REAL DA FUNÇÃO $V_s(A+J\Omega)$	56
FIGURA 11 - VALOR ABSOLUTO DA PARTE REAL DA FUNÇÃO $V_s(A+J\Omega)$	57
FIGURA 12- CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO - B30 – L. MOD. BERG - N_{p1}	61
FIGURA 13 - CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO - B30 – L. MOD. BERG. - CASO N_{p3}	62
FIGURA 14- CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO - B30 - L. MOD. J. MARTI - N_{p1}	63
FIGURA 15- CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO - B30 – L. MOD. J. MARTI – N_{p2}	64
FIGURA 16- CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO ISOLADO- B30 - L MODELO J. MARTI – N_{p1}	65
FIGURA 17- CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO ISOLADO - B30 - L. MOD. BERG. - N_{p1}	66
FIGURA 18- CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO COM TERRA - B30 - L. MOD. J. MARTI - N_{p1}	67
FIGURA 19- CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO COM TERRA - B30 - L. MOD. BERG. - N_{p1}	68
FIGURA 20- CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO COM TERRA - B30 - L. MOD. J. MARTI - N_{p1}	69

FIGURA 21- CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO COM TERRA - B30 - L. MOD. BERG. - N_{p1}	70
FIGURA 22- CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO ISOLADO - B30 - L. MOD. J. MARTI - N_{p1}	71
FIGURA 23- CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO ISOLADO - B30 - L. MOD. BERG. - N_{p1}	72
FIGURA 24 - REDE MODELO DE ANÁLISE.....	80
FIGURA 25 - DISJUNTOR A GRANDE VOLUME DE ÓLEO.	90
FIGURA 26 - DISJUNTOR A PEQUENO VOLUME DE ÓLEO	91
FIGURA 27 - CÂMARA DE EXTINÇÃO A VÁCUO	93
FIGURA 28 - FOTO EXEMPLO DE UNIDADE DE CONTROLE DE DISJUNTORES	94
FIGURA 29 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA DISJUNTOR COM CONTATOS FECHADOS	101
FIGURA 30 - CIRCUITO EQUIVALENTE PARA DISJUNTOR COM CONTATOS RECÉM ABERTOS.....	101
FIGURA 31 - SEPARANDO AS FONTES DE CORRENTE PELO PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO	102
FIGURA 32 - CIRCUITO EQUIVALENTE FINAL DO DISJUNTOR COM CONTATOS RECÉM ABERTOS.....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA I - FATORES DE ASSIMETRIA CORRENTES DE CURTO CIRCUITO	29
TABELA II- PARÂMETROS DAS ENVOLTÓRIAS DAS TRTs - ABERTURA COM CORRENTES CAPACITIVAS.....	42
TABELA III - IMPEDÂNCIAS DO EQUIVALENTE DE THÈVENIN	49
TABELA IV- VALORES DE PICO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	51
TABELA V- VALORES DE PICO DA TRT OBTIDOS NOS CÁLCULOS	73
TABELA VI- FALTAS EM UM SISTEMA DE 500 kV.....	96
TABELA VII - FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS	98

LISTA DE SIGLAS

ATP	Alternative Transients Program
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
RRRV	Rate of Rise of Recovery Voltage
TCTRT	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória
TNL	Transformada Numérica de Laplace
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
TRV	Transient Recovery Voltage

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Erro! Indicador não definido.
2.1	OS DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO	20
2.1.1	A EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO.....	20
2.1.2	O DISJUNTOR A HEXAFLUORETO DE ENXOFRE (SF ₆).....	22
2.1.3	ESPECIFICAÇÃO DOS DISJUNTORES – DADOS PRINCIPAIS ...	25
2.2	A TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA (TRT).....	34
2.2.1	DEFINIÇÃO DA TRT	34
2.2.2	O ESTUDO DA TRT	35
2.2.3	A TRT E A EXTINÇÃO DO ARCO.....	36
2.2.4	AS NORMAS E A TRT.	36
2.2.5	TRT NA INTERRUPTÃO DE FALTAS TERMINAIS	39
2.2.6	TRT INICIAL (TRTI).....	39
2.2.7	TRT NA INTERRUPTÃO DE FALTAS QUILOMÉTRICAS.	40
2.2.8	TRT NA INTERRUPTÃO DE CORRENTE CAPACITIVA	41
3	METODOLOGIA.....	42
3.1	A TRANSFORMADA MODIFICADA DE FOURIER.....	43
3.2	TIPOS DE FALTAS CONSIDERADAS NOS CÁLCULOS.	46

3.3	REDE EQUIVALENTE PARA DEMONSTRAR A METODOLOGIA.....	46
3.4	SIMULAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	49
3.4.1	AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....	50
3.4.2	OBTENÇÃO DA TRT NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	51
3.5	CÁLCULOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	52
3.5.1	IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE NO PONTO DO DEFEITO.....	53
3.5.2	CÁLCULO DA TRT PELO MÉTODO DA TNL.....	54
3.6	A TRT NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	56
4	RESULTADOS	59
4.1	CASO DE CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO.....	60
4.2	CASO DE CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO ISOLADO – TRT.....	64
4.3	CASO DE CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO COM TERRA – TRT.....	66
4.4	CASO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO COM TERRA – TRT.....	68
4.5	CASO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO ISOLADO – TRT.....	70
4.6	MÁXIMOS VALORES DA TRT OBTIDOS NOS CÁLCULOS.....	73
4.7	PRECISÃO DOS CÁLCULOS.....	74
5	CONCLUSÕES.....	75
	REFERÊNCIAS.....	77
	ANEXO I : REDE MODELO PARA OS CÁLCULOS DA TRT.....	77
	ANEXO II - EQUIPAMENTO PARA MANOBRAS DOS CIRCUITOS.....	81

ANEXO III : COMPOSIÇÃO DE UM DISJUNTOR DE ALTA TENSÃO	83
ANEXO IV : SINOPSE DAS PRINCIPAIS FALTAS ELÉTRICAS	95
ANEXO V: INJEÇÃO DE CORRENTES E PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO.....	100

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se atualmente um recurso indispensável para o ser humano. Esse recurso para ser utilizado de forma adequada, não deverá ser avaliado apenas pela sua quantidade disponível, como também pela sua qualidade no fornecimento. Essa visão incentiva à pesquisa de novas soluções que venham ampliar os recursos tecnológicos através do conhecimento científico. Este trabalho enseja modestamente contribuir para essa meta.

- **Objetivos**

Entre os equipamentos de manobras, destacam-se os disjuntores que podem abrir e fechar os circuitos de potência em plena carga e até mesmo em situações de faltas. Os disjuntores em questão são equipamentos utilizados em redes de alta tensão; devido ao seu alto custo e o papel que desempenham nos sistemas elétricos de potência, destacam-se em nível de importância. A TRT é um dos principais parâmetros, entre outros para a especificação correta dos disjuntores. [1]

O presente trabalho tem como objetivo principal o cálculo da TRT no domínio da frequência, considerando a representação de redes complexas e diferentes possibilidades de faltas. As condições e considerações assumidas neste cálculo tem em foco a análise da TRT para disjuntores de extra-alta tensão utilizados nas linhas de transmissão.

Esses disjuntores nos dias atuais, em sua grande maioria utilizam a tecnologia consolidada do gás Hexafluoreto de Enxofre (SF_6), excelente meio extintor do arco, bem como para a isolação das suas partes energizadas, disjuntores estes que são os mais usados para os níveis das tensões elétricas elevadas na atualidade.

Apresenta-se também o contexto da especificação resumida de disjuntores que são as suas principais características elétricas onde a informação da TRT é um requisito que deverá ser quantificado.

Neste trabalho, os casos são equacionados para serem calculados no domínio da frequência; as respostas são convertidas para o domínio do tempo, uma vez que o critério de análise das normas é temporal, estando assim conformadas para as conclusões finais.

São feitas também comparações dos resultados calculados no domínio da frequência, com os resultados obtidos com o programa ATP no domínio do tempo.

Ainda como um último objetivo também é investigado a variação no resultado final do cálculo da TRT no domínio da frequência, em função da precisão adotada nos cálculos, a fim de se avaliar os recursos computacionais mínimos necessários.

- Especificação dos Equipamentos nos Sistemas Elétricos de Potência.

Deseja-se apresentar o contexto no qual a correta especificação dos equipamentos em um sistema elétrico de potência assume um papel de primordial interesse.

Nas diferentes fases da implantação dos sistemas, desde as realizações dos primeiros estudos de viabilidade econômica e técnica, são exigidas equipes multidisciplinares focadas para um dos ideais comuns que é o fornecimento de energia elétrica, com a máxima qualidade possível que a tecnologia pode oferecer.

A interligação entre os diversos sistemas elétricos remotos, também denominada malha do sistema elétrico interligado, é um exemplo típico que comprova a viabilidade de fornecimento de energia elétrica sustentável; hoje a malha interligada é de grande valia e se mostrou efetiva para a elevação do nível de aproveitamento racional dos recursos disponíveis, e do aumento da confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, contribuindo para uma redução significativa de novos investimentos.

Através dos estudos de fluxo de potência para determinação das correntes nominais, análise das correntes de curtos-circuitos para dimensionamento dos equipamentos e da capacidade de interrupção dos disjuntores, bem como o estabelecimento dos níveis de isolamento pelos estudos de sobretensão, entre outros estudos, a engenharia elétrica busca as melhores soluções viáveis; de posse dos estudos apontados acima, a topologia da rede e os principais parâmetros operacionais podem ser definidos. Assim, com as condições operacionais nominais e de falhas estabelecidas, as características elétricas dos equipamentos que fazem parte da rede podem ser apontadas. [2]

As especificações dos equipamentos dos sistemas elétricos de potência e entre eles, os disjuntores de alta tensão, são elaboradas utilizando-se os resultados de estudos de casos de defeitos obtidos por simulações de transitórios eletromagnéticos.

Esses mesmos estudos são realizados também para a preparação das expansões dos sistemas, visando à substituição de equipamentos superados [2].

Resumindo o que foi dito, o suprimento da energia elétrica na atualidade, precisa obedecer a padrões rígidos, a fim de atender à quantidade requerida na qualidade desejada, pois em caso contrário, compromete-se a qualidade de vida e a economia de um país. Para isso, o correto desempenho dos disjuntores é mandatório; disso depende uma perfeita especificação do equipamento. Esta é a principal argumentação motivadora à realização deste trabalho.

- Estruturação do trabalho

O trabalho é estruturado em seis capítulos, cujos conteúdos são resumidos abaixo:

O segundo capítulo é uma Fundamentação Teórica, iniciado pela apresentação do disjuntor de alta e extra-alta tensão mostrando de forma resumida a sua principal função nas redes elétricas de potência. É apresentado o fenômeno do arco elétrico que representa o desafio para o qual o disjuntor precisa lidar. Mostra-se o disjuntor

que para essa aplicação, ainda é considerado uma das melhores soluções, o disjuntor a Hexafluoreto de Enxofre (SF_6). São apresentados os dados principais, componentes indispensáveis de uma especificação de disjuntor, discriminando e detalhando vários parâmetros entre eles a TRT e para diversas situações específicas como: discordância de fases, interrupção de linhas em vazio e bancos de capacitores. Salientam-se também algumas situações especiais nos cálculos da TRT como: TRT em faltas terminais, TRT inicial – TRTI, TRT na interrupção de faltas quilométricas e a TRT na interrupção de correntes capacitivas.

No terceiro capítulo é mostrada a metodologia adotada no trabalho. Mostra a formulação necessária para o uso da transformada modificada de Fourier, também conhecida por transformada numérica de Laplace (TNL). São especificados os principais tipos de faltas que serão considerados nos cálculos. É apresentada a rede equivalente no domínio da frequência do caso de uma falta trifásica isolada na barra, e desta forma elabora-se a generalização a partir desse exemplo. O cálculo no domínio do tempo é utilizado para servir como referência dos cálculos apresentados nesta pesquisa. São estabelecidos os parâmetros para análise da precisão dos resultados, e com isso discute-se a capacidade computacional necessária.

O quarto capítulo inicialmente apresenta a rede modelo de análise. Trata-se de uma rede genérica, hipotética. Mostra-se que ela representa um modelo de rede complexa a fim de que seja o ambiente apropriado para os estudos propostos. Neste capítulo, são apresentados os resultados dos cálculos referentes aos cinco tipos de faltas propostas: curto-circuito monofásico, bifásico isolado, bifásico com terra, trifásico isolado bem como trifásico com terra. Consideram-se nestes casos também dois casos de modelagens de linha, Bergeron e J. Marti e três casos de precisão de cálculos.

O quinto capítulo é o das conclusões. Inicialmente mostra-se através da curva da TRT no domínio da frequência que os cálculos apresentados nesse domínio podem ser considerados fidedignos e com precisão acima do que é necessário.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 OS DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Os disjuntores de alta tensão são fundamentais nas malhas das redes elétricas dos sistemas de potência, são equipamentos de alto custo, aos quais se dedicam especiais atenções tanto no regime permanente quanto no regime transitório. Ressalta-se que defeitos na operação dos disjuntores, podem impactar diretamente no fornecimento de energia elétrica, e reduzem o seu nível de qualidade.

Diante de faltas no sistema elétrico, um disjuntor não deve sofrer redução em sua capacidade de interrupção de correntes, bem como alteração alguma em qualquer função operacional. Nessas ocorrências, eles são solicitados a mudar de estado, aberto ou fechado e, portanto em condições bem mais adversas que aquelas em operações nominais de carga.

Nestas condições extremas de faltas, a operação bem sucedida de um disjuntor, permite a redução do impacto da falta no comportamento da rede, mantendo o sistema o mais próximo possível das condições nominais de operação, e possivelmente evitando *blackouts*.

Por esses motivos enfatiza-se a grande necessidade da correta especificação dos equipamentos elétricos, onde os disjuntores assumem um papel fundamental no desempenho dos sistemas de potência.

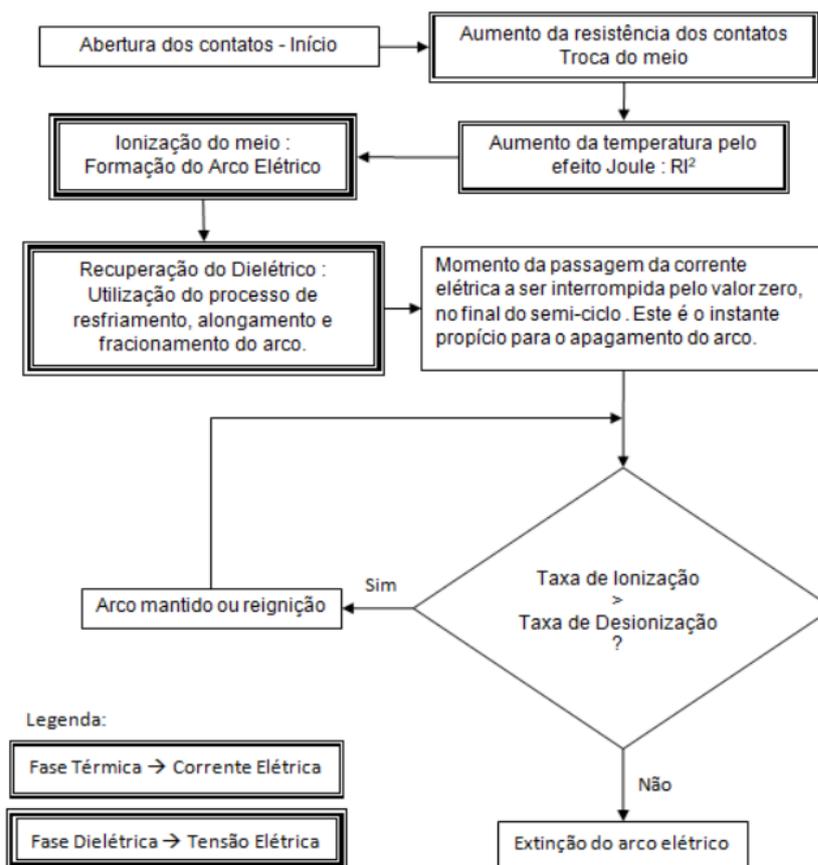
2.1.1 A EXTINÇÃO DO ARCO ELÉTRICO.

A câmara de extinção é a principal unidade de um disjuntor, pois é ali que estão inseridos os seus contatos principais, os elementos finais responsáveis pelo estabelecimento e pela interrupção da corrente do circuito na rede elétrica onde o disjuntor está inserido.

É durante a interrupção da corrente que ocorre o fenômeno do arco elétrico; se esse arco permanecer durante um intervalo de tempo superior a certo limite, ocorrerá a destruição dos contatos principais e de outros componentes da câmara de extinção. Por isso a extinção do arco elétrico é de vital importância e que seja feita da forma mais breve e eficaz possíveis.

Abaixo, apresenta-se a Figura 1 cujo diagrama mostra o princípio básico de funcionamento da câmara de extinção de um disjuntor, nas suas fases operacionais características: a fase térmica que é regida pela corrente elétrica que está sendo interrompida e a fase dielétrica que é controlada pela tensão elétrica.

Figura 1- A Interrupção da corrente e fases da extinção do arco



Fonte: Autor

Tendo sido o arco provisoriamente extinto, não se pode considerar que a missão esteja cumprida. O esboço acima contempla a possibilidade de uma reignição ou *reignition*, cujo nome é apropriado se esse fenômeno ocorrer até $\frac{1}{4}$ do ciclo; caso contrário ele é identificado por reacendimento ou *restrike*.

O conceito de uma câmara de extinção é definido pelo meio e o mecanismo de extinção utilizado e que se torna também a forma que caracteriza e identifica um disjuntor. Esse conceito é também conhecido por: Técnica de Interrupção de Arco.

A seguir, é apresentado um disjuntor cujo conceito de câmara de extinção é bem utilizado no momento, cujo desempenho se destaca entre os mais avançados do gênero, típico para a aplicação que representa o ambiente básico deste trabalho – rede elétrica com linhas de transmissão em extra-alta tensão.

2.1.2 O DISJUNTOR A HEXAFLUORETO DE ENXOFRE (SF₆).

O SF₆ é um excelente gás para a utilização como meio extintor do arco-elétrico. Podem-se apontar várias propriedades físicas e químicas que o tornam apto a essa função: é um meio isolante, incombustível, atóxico, incolor, inodoro, altamente inerte e estável (sem mudança de estado) até a temperatura de aproximadamente 500°C, pois apresenta uma estrutura molecular simétrica. Esse gás possui uma baixa temperatura de ionização além de sua grande capacidade de troca de calor. Ele tem um comportamento semelhante ao comportamento de um gás nobre.

A extinção do arco elétrico é cem vezes mais rápida no hexafluoreto de enxofre do que no ar para as mesmas condições ambientais que os gases foram submetidos; ainda para esse meio, observa-se uma rigidez dielétrica da ordem de duas vezes e meia em relação ao ar.

Outro fator que contribui muito para que o SF₆ tenha uma alta taxa de redução da sua condutância na passagem da corrente elétrica pelo seu valor nulo ou *zero-crossing*, é o fato de ele ser eletronegativo, em outras palavras grande habilidade para capturar elétrons livres, removendo-os do arco elétrico.

Salienta-se que a rigidez dielétrica nesse gás é diretamente proporcional à pressão que ele está submetido; dessa forma, quando essa pressão aumenta, a rigidez dielétrica do gás também aumenta; o aumento propicia menor distância de separação para isolamento dos contatos, permitindo menores câmaras para os mesmos níveis de tensão elétrica. Assim menores estruturas e menores equipamentos poderão ser utilizados.

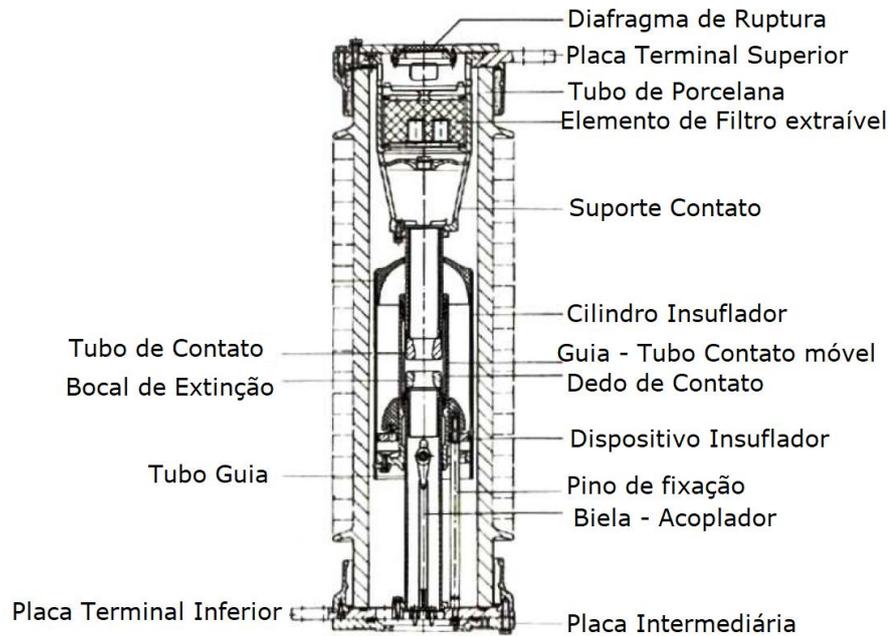
No início das pesquisas para o uso do SF₆ como meio extintor nos disjuntores, a estratégia era armazená-lo em cilindro com pressão ao redor de 20 bar, soprá-lo nos contatos para extinção do arco elétrico, conservando-o a uma pressão próxima a 2,5 bar; nesse novo ambiente funcionava como elemento isolante entre as partes vivas e a terra; sendo atingido um valor pré-fixado de pressão, novamente ele era bombeado para o cilindro de 20 bar. Esse projeto tinha a capacidade de interrupção de altas correntes elétricas em um tempo de interrupção bem reduzido. Porém, a alta complexidade do projeto mecânico, a baixa confiabilidade no equipamento de pressurização e a característica do gás liquefazer-se a baixa temperatura quando submetido a altas pressões, foram fatores que indicaram a necessidade de mudança no projeto em busca de soluções para as limitações apresentadas.

É desenvolvido um projeto mais simples, com o mesmo conceito, porém de pressão única, sem a necessidade do compressor. Este novo projeto contempla na câmara de extinção um dispositivo que promove uma sobrepressão momentânea e localizada junto aos contatos, criando um fluxo do gás que resfria, alonga, subdivide e extingue o arco elétrico; esse dispositivo é acionado diretamente pela haste de movimentação do contato. Veja a Figura 2 . Esse sistema de autossopro também é conhecido pela expressão *Puffer*. Da mesma forma que os disjuntores a ar comprimido, os bocais para circulação do gás podem ser dos tipos unidirecionais ou bidirecionais.

Assim, com as desvantagens sendo superadas, e as vantagens preservadas, pode-se utilizar o equipamento em ambientes até vinte graus centígrados abaixo de zero, pois a pressão do gás na câmara varia apenas entre 3,5 e 7,0 bar.

Na Figura 3, observam-se Instalações de ultra-alta tensão de 800 kV que utilizam modernos disjuntores a SF₆ [2].

Figura 2- Câmara de Extinção SF₆ – Pressão Única



Fonte: Colombo, R. [3]

Figura 3- Disjuntores SF₆



Instalação abrigada

e

Instalação ao tempo

Fonte : Catálogo XD/GE [4]

2.1.3 ESPECIFICAÇÃO DOS DISJUNTORES – DADOS PRINCIPAIS

Apresenta-se uma recomendação para a especificação de disjuntores de alta tensão para sistemas elétricos de potência, onde são salientados os diversos parâmetros essenciais que definem as limitações operacionais dos equipamentos, os que dizem respeito apenas ao circuito principal cuja corrente é estabelecida ou interrompida. Mesmo os tópicos abordados são tratados superficialmente, pois o assunto requer grande quantidade de informação e necessita um documento exclusivo para ele; é dada maior atenção aos assuntos que estão relacionados ao estudo da TRT, para os quais existe um subitem 2.2 específico a eles. Deseja-se apenas uma modesta contextualização do assunto principal deste trabalho.

As normas utilizadas são NBR IEC 62271-1: 2007 [5] e IEEE Std C37.04-2018 [6].

a) Características Gerais de Equipamentos Elétricos em Sistemas de Potência.

- Corrente Elétrica Nominal que percorre o equipamento.

A determinação da corrente nominal dos equipamentos elétricos é feita com base nos estudos de fluxo de potência em busca de seus valores máximos e nas condições mais severas (emergências) e também em configurações futuras.

- Correntes de Curto-Circuito.

Devem ser levantados os seguintes valores: a percentagem da componente contínua na abertura dos contatos, responsável pela assimetria; o Valor de Pico Máximo da corrente de curto-circuito assimétrica, responsável pela característica dinâmica dos equipamentos; o Valor eficaz da corrente simétrica, responsável pela característica térmica dos equipamentos.

É necessária a determinação da constante de tempo da componente contínua da corrente de curto-circuito, através da relação X/R (relação entre a reatância e a resistência da rede considerada).

b) Características Específicas de Disjuntores em Sistemas de Potência.

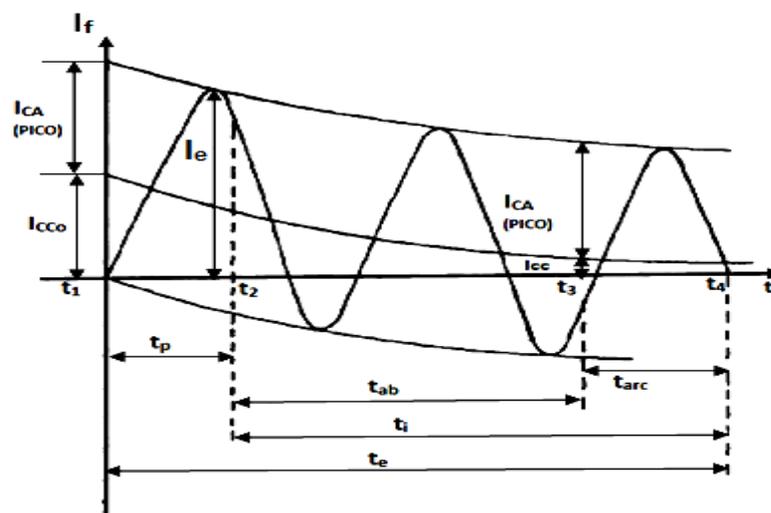
• Características Relativas à Manobra de Corrente de Falta.

Na análise das correntes de curto-circuito pode-se observar que elas são formadas por duas componentes: uma delas é periódica e chamada de componente CA, a outra é aperiódica e denominada componente CC ou unidirecional.

Considere-se um disjuntor trifásico que está em processo de interrupção de um curto-circuito; as correntes das fases terão algum tipo de assimetria cuja intensidade depende do tipo de curto-circuito bem como do instante que a falta ocorre. Cada polo do disjuntor interrompe a corrente correspondente de uma forma independente uma da outra. Assim, é preciso que a operação de interrupção em cada polo seja bem sucedida, mesmo na ocorrência de se ter as componentes CA e CC nas mais desfavoráveis situações simultaneamente no mesmo polo.

Na Figura 4 abaixo, são mostrados os parâmetros que precisam ser definidos, pois eles atestam as reais condições de operação do equipamento; essa correta definição garante operações seguras do disjuntor.

Figura 4- Evolução da corrente assimétrica de curto-circuito (I_f) ao longo do tempo, com indicação dos parâmetros característicos



t_1 – instante de ocorrência da falta.

t_2 – instante de energização da bobina de abertura do disjuntor.

t_3 – instante da separação dos contatos do disjuntor.

t_4 – instante de interrupção da corrente.

t_p – tempo de atuação da proteção.

t_{ab} – tempo de abertura do disjuntor.

t_{arc} – tempo de duração do arco elétrico.

t_i – tempo de interrupção da falta pelo disjuntor.

t_e – tempo para eliminação da falta.

I_e – corrente de estabelecimento.

$I_{CA(pico)}$ – valor de crista da componente CA da corrente de falta ($\sqrt{2} \cdot I_{CA(eficaz)}$).

I_{CCO} – valor inicial da componente CC da corrente de falta (notar que, para a condição de máxima assimetria admitida, $I_{CCO} = I_{CA}$).

I_{CC} – valor da componente CC da corrente de falta no instante da separação dos contatos do disjuntor.

Fonte: Frontim, S. O. [2]

- Tempo de interrupção nominal em ciclos:

É o maior tempo t_i gasto pelo disjuntor para interromper uma corrente de valor qualquer. Típicos valores de $t_i = 2$ a 5 ciclos

- Capacidade de interrupção nominal em curto-circuito:

É a corrente de curto-circuito em seu valor mais alto que o disjuntor consegue interromper, cujo ensaio nas condições de uso é regido pela norma IEC/TR 62271-306 [7]. As componentes CA e CC caracterizam esse parâmetro que deverá ser ensaiado.

- Valor da componente periódica (kA, eficaz)

Escolhe-se um valor de corrente que seja superior à maior corrente de curto-circuito monofásica ou trifásica calculada, na subestação local da instalação do

disjuntor considerado. Essa margem é tipicamente da ordem de 20%. Esse valor é um valor padronizado com base na série R10 – valores entre 10 e 80 kA.

- Valor da componente aperiódica

Esse valor segundo a norma IEC/TR 62271-306 [7] deve ser especificado em percentagem do valor inicial I_{CC0} e pode ser calculado com a expressão:

$$I_{cc}(\%) = 100 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

onde t representa o tempo tendo como referência o instante do início da falta e τ é a constante de tempo do circuito referido aos terminais do disjuntor. Essa constante pode ser obtida com a expressão que segue:

$$\tau = 1000 \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{X}{R} \quad (ms) \quad (\omega \text{ em } rad / s)$$

- Capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito (kA, crista)

É o maior valor instantâneo de corrente (certamente uma corrente de falta) que o disjuntor tem a capacidade de estabelecer, em outras palavras, fechar os contatos e mantê-los fechados, estando em operação com tensão nominal.

O primeiro pico de corrente após o início de uma falta geralmente é considerado o maior valor instantâneo de uma corrente de falta. Ele pode ser encontrado usando-se a expressão abaixo:

$$I_{fmax} = I_{CA(eficaz)} \cdot f \quad (f \equiv \text{fator de assimetria})$$

O fator “ f ” pode ser calculado usando : $f = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{t}{\tau}})$

com $t = 8,33 \text{ ms}$ (para 60 Hz) ou $t = 10 \text{ ms}$ (50 Hz)

A Norma IEC/TR 62271-306 [7] padroniza os seguintes fatores de assimetria que estão na Tabela I abaixo:

Tabela I - Fatores de Assimetria Correntes de Curto-Circuito

FREQUÊNCIA (Hz)	FATOR DE ASSIMETRIA $f =$
50 Hz com $\tau = 45 \text{ ms}$	2,5
60 Hz com $\tau = 45 \text{ ms}$	2,6
Independente da frequência, e casos especiais de constante de tempo	2,7

Fontes : [8] e FRONTIN, S.O. – P584 [2]

Observação: Nos casos que os curtos-circuitos geram componentes de alta frequência, exemplo de circuitos com bancos de capacitores, o valor do pico máximo da corrente em alta frequência deverá ser especificado juntamente com o correspondente pico máximo da corrente à frequência industrial.

- Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), e assuntos correlatos: TRTs na interrupção de faltas terminais, Tensão de restabelecimento transitória inicial (TRTI), TRTs na interrupção de faltas quilométricas.

A TRT é definida como a diferença de potencial desenvolvida entre os terminais dos contatos de um disjuntor, logo em seguida à interrupção de uma corrente, no período transitório, o período anterior ao amortecimento das oscilações.

Um disjuntor para ser considerado apto a desempenhar determinada função em uma rede de um sistema elétrico de potência, não basta que ele demonstre capacidade de interrupção a todas as correntes nominais e de falhas, pois essa é apenas uma entre outras características requeridas para sua especificação; um quesito tão crítico quanto aquele é a sua capacidade de suportar uma tensão entre seus terminais recém-abertos com valor não inferior à TRT especificada.

A TRT e os assuntos correlatos são tratados com mais detalhes no subitem 2.2 abaixo.

- Condições de abertura em discordância de fases.

Essas condições requerem uma análise nas interligações apontadas abaixo:

- ✓ entre duas estações geradoras ou,
- ✓ entre duas partes de um sistema elétrico independentes quanto à geração.

Um disjuntor estabelecendo uma das interligações mencionadas acima pode ser solicitado a interromper a conexão em um instante em que as partes estão em discordância de fase; neste caso o valor da TRT pode ser superior aos gerados por curtos-circuitos. Outras situações que poderiam operar a abertura de disjuntores em discordância de fases podem ser identificadas pela proteção da detecção de oscilações de potência sustentadas, ou pela detecção da circulação de altas correntes.

A experiência tem mostrado que em sistemas interligados, a combinação das contingências necessárias para a ocorrência da abertura de disjuntores em discordância de fase tem baixa probabilidade de sua ocorrência. [2]

Não é obrigatório segundo a norma IEC/TR 62271-306 [7] que as características especiais com relação à abertura em discordância de fases sejam

especificadas, mesmo que o disjuntor esteja esporadicamente sujeito a elas. O que é pedido por norma segue abaixo:

- ◆ Capacidade de interrupção nominal em discordância de fases (kA, eficaz)

Como resposta ao questionamento citado acima, a norma [8] especifica o parâmetro em referência a um valor de 25% da componente CA da capacidade de interrupção nominal em curto-circuito.

- ◆ Requisitos de TRT para abertura em discordância de fases

Sendo prevista a operação de abertura do disjuntor em discordância de fases, esses requisitos deverão ser especificados. Esse cálculo da TRT é elaborado em condições de discordância de fases e na ausência de faltas; nessas condições, calcula-se a TRT da forma como explicada no subitem 2.2 abaixo.

- Problemas das correntes críticas

Alguns problemas no desempenho de disjuntores a óleo no passado levaram a preocupação com determinadas correntes de baixo valor, mostrarem-se críticas para a extinção do arco. Esses problemas eram advindos de construções de equipamentos rudimentares que não favoreciam o necessário resfriamento do arco e consequente restauração do meio dielétrico na câmara de extinção, quando ela existia. Isso permitiu o desenvolvimento da tecnologia ligada à extinção dos arcos nas câmaras e a correspondente normatização adequada. Para qualquer tipo de disjuntor de algumas séries indicadas, a norma IEC/TR 62271-306 P163 item 12.2.2 [7] recomenda a prática de ensaios de corrente crítica, sempre que nos ensaios de interrupção de curtos-circuitos, um determinado tempo de arco mínimo tenha sido alcançado.

- Abertura e fechamento de correntes capacitivas.

A expressão “Correntes Capacitivas” diz respeito àquelas associadas aos bancos de capacitores ou às linhas de transmissão terminadas em circuito aberto (chamadas por linhas em vazio).

Após a abertura dos contatos de um disjuntor que energizava um banco de capacitores ou uma linha em vazio, tanto uma quanto outro permanecem eletricamente carregados mesmo com os contatos do disjuntor abertos, mantendo aproximadamente o mesmo potencial do instante de abertura; a pequena redução nesse potencial acontece devido às correntes de fuga, enquanto que a tensão do outro lado do contato segue a tensão da fonte acompanhando a frequência da rede. Devido à presença dessa tensão inicial, a TRT se desenvolve com uma taxa de crescimento relativamente baixa, permitindo a rápida extinção do arco assim que o valor da corrente alcança o próximo zero. Com essa rápida extinção, no final do próximo meio ciclo, os contatos recém-abertos ainda estão muito próximos e pode ocorrer um reacendimento do arco (não é uma reignição. Vide 2.1.1).

Conforme a literatura [7], tanto a reignição quanto o reacendimento impactam na qualidade do suprimento da energia elétrica, apesar da reignição ser tolerada para interrupção de correntes capacitivas por não produzirem sobretensões conforme IEEE Std C37.012-2005 p6 [9].

Para o fechamento de correntes capacitivas há que se distinguir:

- ✓ operação com bancos de capacitores com (back-to-back) ou sem pré-energização, que formam correntes de alta frequência, a serem suportadas pelo disjuntor e cujas correntes podem ser reduzidas com a utilização de resistores de pré-inserção ou reatores série na malha,
- ✓ operação com linhas em vazio pela natureza distribuída de suas reatâncias e capacitâncias, dois fenômenos se sobrepõem: Efeito Ferranti e Propagação de Ondas. A superposição deles pode dar

lugar a descargas disruptivas nas linhas longas. Para diminuir esse problema, e também reduzir o valor da sobretensão de manobra, os disjuntores para essa finalidade devem ser equipados com resistores de fechamento cujos valores em ohm precisam ser da ordem da impedância de surto da linha, e são curto-circuitados com um atraso de 10 a 20 ms.

- Capacidade de interrupção nominal de linhas em vazio ou de bancos de capacitores.

É a maior corrente que o disjuntor deve estar apto a interrompê-la no tipo de manobra em referência, em tensão nominal nas condições especificadas pela norma [8]. A corrente será determinada pelo comprimento da linha.

É prática de aplicação frequente, para definição desse parâmetro a consideração dos valores mais elevados de sobretensão sustentada e sobrefrequência possíveis em seguida a contingências como rejeições de carga que precedem a abertura. Nesse caso, os valores dessa sobretensão e sobrefrequência serão determinados por estudos dinâmicos.

Essa corrente não deve exceder a corrente nominal do disjuntor.

- Tensão de restabelecimento associada à interrupção de corrente capacitiva

Sendo prevista a operação de abertura do disjuntor com corrente capacitiva, a TRT deverá ser especificada; nessa condição, calcula-se a TRT da forma como explicada no subitem 2.2 abaixo.

- Capacidade de estabelecimento em operação isolada ou back-to-back

A manobra de bancos de capacitores geralmente é executada diariamente.

Para se definir essa capacidade, deve-se especificar o valor de pico da corrente, a frequência e a constante de tempo da envoltória da oscilação de alta frequência. Deve-se também especificar a expectativa do número de operações totais durante certo período de tempo, em geral um ano, para o qual não se deseja a manutenção, substituição dos contatos ou demais partes do mecanismo ao longo da vida útil do equipamento.

- Corrente de curta duração para curtos-circuitos próximos a bancos de capacitores

Além da declaração da corrente suportável nominal de curta duração da componente de frequência fundamental, especifica-se o valor de pico da corrente, a frequência e a constante de tempo da envoltória da oscilação.

Essa especificação não é apenas para os disjuntores que operam o chaveamento dos capacitores, mas a todos os disjuntores que se situam às vizinhanças dos bancos de capacitores e ficam à mercê das correntes de alta frequência nos casos de curtos-circuitos nas malhas da rede.

2.2 A TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA (TRT)

2.2.1 DEFINIÇÃO DA TRT

Considera-se uma rede elétrica de um sistema de potência operando em corrente alternada e um disjuntor que estando com seus contatos principais fechados, executa a operação de abertura desses contatos para a interrupção da corrente elétrica circulante. A tensão elétrica que se desenvolve entre os contatos

recém-abertos, no período de tempo transitório que precede as oscilações e correspondentes amortecimentos da tensão, é chamada de Tensão de Restabelecimento Transitória ou TRT.

2.2.2 O ESTUDO DA TRT

Uma rede elétrica em corrente alternada tem uma natureza predominantemente indutiva diante de um curto-circuito e que poderá apresentar após a eliminação dessa falta, um comportamento oscilatório ou não, dependendo dos equipamentos e da topologia adotada. Com isso fica exposta a complexa interdependência entre as tensões e as correntes elétricas que são as grandezas responsáveis pelo desempenho dessa rede e demonstram a capacidade de um disjuntor eliminar o curto-circuito.

O estudo da TRT pode ser elaborado, considerando-se dois parâmetros principais que o caracterizam: a sua amplitude máxima (o valor de pico) e a sua taxa de crescimento (a inclinação da subida de tensão).

A TRT como um parâmetro que indica a limitação operacional de um disjuntor, pois se trata de uma sobretensão no equipamento, precisa ser bem calculada a fim de proporcionar uma operação segura. Nos cálculos da TRT, deve-se levar em consideração não as condições nominais do sistema e sim os casos de falta, pois eles apresentam as demandas mais severas da TRT para o disjuntor no sistema. No caso de cálculo da TRT em discordância de fase, como já mencionado no subitem 2.1.3, não são considerados os casos de faltas, mas apenas as considerações da discordância.

A Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (TCTRT) está bem explicada no estudo de PRETO, P. O. referência [10]; esse último parâmetro não será tratado neste trabalho, mas a formulação para os cálculos dos cinco tipos de curtos-circuitos são aproveitadas para a generalização necessária ao desenvolvimento da formulação para este trabalho.

2.2.3 A TRT E A EXTINÇÃO DO ARCO

A câmara de extinção de um disjuntor é projetada de forma a propiciar o rápido resfriamento do arco elétrico e diversas técnicas são utilizadas para esse propósito, que podem ser vistas no Anexo III. Com a extinção do arco, promove-se um resfriamento forçado que contribui com a desionização do meio dielétrico. Pode-se dizer que o dielétrico está sendo restaurado com uma taxa que é correspondente à eficiência da técnica utilizada.

No início da abertura dos contatos do disjuntor, estando eles ainda próximos, à medida que a distância entre eles segue aumentando, a TRT também aumenta e essa taxa de crescimento (TCTRT) deverá ser menor que a taxa de restauração do dielétrico do meio extintor; isso para evitar uma reignição do arco.

Após essa fase inicial, os contatos estão posicionados a uma distância de separação maior, e com o meio dielétrico mais restaurado, porém a TRT está ainda em crescimento e atingindo o seu valor máximo; nesse instante a magnitude desse valor é de vital importância, pois é necessário que ele esteja abaixo da capacidade de ruptura dielétrica do meio isolante naquele instante, impedindo a reignição.

2.2.4 AS NORMAS E A TRT.

As normas representam os marcos tecnológicos que norteiam as atividades profissionais em suas diferentes áreas de atuação. Ao mesmo tempo em que definem parâmetros limites e operacionais, elas recomendam soluções aplicáveis em diversas situações, soluções que estando padronizadas, facilitam as atividades dos profissionais e o aprendizado dos estudantes da matéria em questão. Encontram-se nelas também, dados para construção dos equipamentos, estratégias para soluções de questões em projetos, dados e procedimentos para realização de ensaios bem como informações para manutenção.

O desenvolvimento deste trabalho levou em consideração as normas IEC europeias e ANSI / IEEE americanas; diversos grupos de tarefas com especialistas da área e de diversos países foram formados a fim de harmonizá-las

adequadamente. Salienta-se que no Brasil a maioria das empresas que fabricam disjuntores é de origem europeia e a própria ABNT harmoniza suas normas, preferencialmente com as normas IEC (novo prefixo das normas brasileiras: NBR IEC).

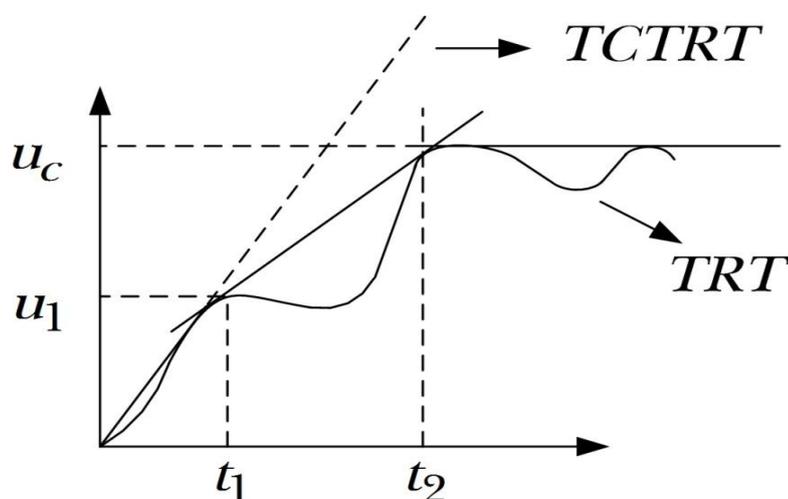
Para a aplicação dos parâmetros que são referências dos valores da TRT, foram construídas envoltórias que são curvas formadas por seguimentos de retas e que podem ser definidas por dois ou quatro parâmetros. Para tensões de isolamento até 100 kV são utilizadas curvas de dois parâmetros; acima desse limite e dependendo também do nível atingido de sobretensão da TRT, são usadas as curvas de quatro parâmetros.

A dinâmica da extinção dos arcos elétricos é regida por complexas leis físicas, e não são explicitamente tratadas nas normas de disjuntores. Não serão tratadas também neste trabalho. Esse assunto, porém não é desconsiderado, pois essas mesmas normas incluem todo o conhecimento e a tecnologia desenvolvidos na forma de curvas envoltórias para a correta especificação dos disjuntores. [1]

O traçado da envoltória procura posicionar os pontos de limitação dos parâmetros na região do plano que acompanha a curva da TRT, principalmente quando atinge o seu valor máximo.

A Figura 5 ilustra a curva de quatro parâmetros das referências [8] e [7], para disjuntores de alta tensão com isolamento superior a 100 kV, curva largamente utilizada pelas empresas brasileiras de transmissão de energia elétrica; salienta-se que o primeiro pico intermediário da curva poderá ou não existir. A curva da TRT deverá ficar contida abaixo das envoltórias definidas pelos pares (u_1, t_1) e (u_c, t_2) .

Figura 5- Curva de quatro parâmetros IEC



Fonte: ZANETTA JR.2020 – P607 [1]

Para verificação da adequação do disjuntor, normalmente são utilizadas as curvas envoltórias das normas IEC referência [8] e [7] definidas por 2 e 4 parâmetros, podendo também ser utilizadas as envoltórias da referência [11].

Os conceitos para a obtenção das curvas envoltórias de [8], [12] e [7] são desenvolvidos em [11], indicando os principais fenômenos que afetam as taxas de crescimento e os valores de pico, incluindo as reflexões de linhas de transmissão conectadas à barra com a falta.

A referência [13] faz uma discussão bem detalhada dos parâmetros apresentados pelas referências [8], [12] e [7].

Na escolha do disjuntor apropriado para uma aplicação em rede elétrica de potência, após a verificação dos parâmetros nominais e dos estudos das faltas principais da rede, é feita a análise da TRT obtida por simulações ou por cálculos como os do presente trabalho, e essa curva não poderá superar a envoltória característica do disjuntor, definida pelas normas.

Assim o disjuntor escolhido, cujo fabricante atende às normas pertinentes, também atende à necessidade do projeto.

2.2.5 TRT NA INTERRUPTÃO DE FALTAS TERMINAIS

As faltas terminais têm essa designação por serem aquelas que se desenvolvem nas imediações dos terminais dos disjuntores que podem ser os barramentos ou nas saídas de linhas.

A TRT que se obtém na condição de interrupção de faltas terminais é de particular interesse por causa da sua intensidade, tornando-se um dos principais casos analisados nos estudos do assunto.

Essa é a condição adotada para o modelo de caso do presente trabalho.

2.2.6 TRT INICIAL (TRTI)

A Tensão de Restabelecimento Transitória Inicial, TRTI é definida de forma semelhante à TRT, porém para os momentos logo após e bem próximos à interrupção da corrente no disjuntor. Para esse cálculo há um fator que é preponderante e, portanto levado em consideração e se destaca dos demais: a influência dos equipamentos que estão localizados nas imediações do disjuntor, na subestação onde ele está instalado, ou em localidades cuja distância não supere a 1000 m; é pelos seus parâmetros que a TRTI é calculada.

Observa-se que o efeito do fenômeno da propagação de ondas considerado nesse caso é aquele produzido pelas suas reflexões nos barramentos da subestação. Esse estudo, portanto tem um reduzido espaço físico a ser considerado no cálculo, que são as vizinhanças onde o disjuntor está instalado. Além disso, o intervalo de tempo considerado fica ao redor de 1 μ s, o que faz com que o fenômeno seja constituído por frequências muito altas [1].

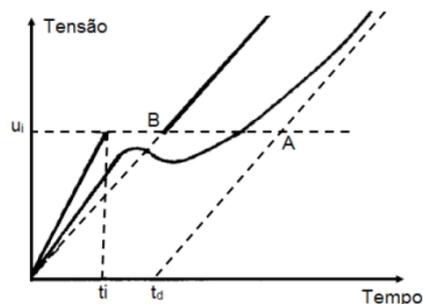
A norma IEC 62271-1 [8] recomenda uma envoltória simples para a limitação da TRTI; trata-se de um segmento de reta que se liga a partir da referência a um ponto u_i (kV), t_i (μ s), veja Figura 6. A curva da TRTI calculada deverá ficar em

posição não acima dessa envoltória, o que representa satisfazê-la em todos os seus pontos.

O ponto u_i (kV), t_i (μs) é definido pela norma em função da tensão nominal do disjuntor e da sua capacidade de interrupção nominal em curto-circuito.

O valor do atraso t_d é obtido das normas em função da tensão nominal bem como do tipo de falta do sistema.

Figura 6– Relação entre as envoltórias da TRT e da TRTI



Variação da grandeza “ t_i “: $0,4 \mu\text{s} < t_i < 1,5 \mu\text{s}$

Fonte : FRONTIN, S. O. – P592 [2]

2.2.7 TRT NA INTERRUÇÃO DE FALTAS QUILOMÉTRICAS.

A falta é denominada quilométrica quando ela se desenvolve, a poucos quilômetros de distância do disjuntor que pode manobrá-la.

Esse tipo de falta pode se constituir em uma tarefa difícil a ser vencida pelo disjuntor; note-se que:

- ✓ pelo fato da falta não estar muito distante, a corrente de curto-circuito ainda pode ser considerada alta,
- ✓ a TCTRT também tem valores geralmente superiores às faltas terminais,

- ✓ com valores de correntes elevados, maior é a dificuldade do disjuntor em suportar a taxa de crescimento da TRT (TCTRT) imposta pela rede,
- ✓ da mesma forma, dependendo do estado da rede, o valor de pico da TRT também é elevado,
- ✓ as normas recomendam um tratamento separado entre as tensões desenvolvidas do lado da fonte e da linha em relação aos polos do disjuntor, pois do lado da linha surgem oscilações de alta frequência na forma de ondas triangulares nos instantes iniciais após a interrupção da corrente.

Os fatores acima representam dificuldades para a extinção do arco e à promoção da interrupção da corrente no disjuntor.

A especificação do disjuntor deve atender às imposições desse caso, portanto a TRT não pode ser encontrada em superação à envoltória recomendada pelas normas.

Referências [1] e [2]

2.2.8 TRT NA INTERRUPÇÃO DE CORRENTE CAPACITIVA

A norma IEC 62271-100 [8] estabelece parâmetros para definição de envoltórias que são usadas como referenciais no estudo da TRT com corrente capacitiva.

Os parâmetros que definem a envoltória são identificados por (u_1, t_1, u_c, t_2) onde o parâmetro u_c representa o valor de pico da TRT

Podem-se obter esses parâmetros, através das tabelas e gráficos, enquanto que o parâmetro u_c é calculado pela expressão:

$$u_c = 1,95 \cdot 1,4 \cdot U_r \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

esse valor é calculado para sistemas elétricos com frequência de 60 Hz onde U_r é o valor de pico da tensão de ensaio estabelecido na norma. Além disso, deve-se considerar esse valor para uma interrupção em presença de faltas monofásicas ou bifásicas e em sistemas com o neutro aterrado.

A título de exemplo, apresenta-se a Tabela II abaixo que mostra algumas tensões nominais, e valores de u_c calculados pela expressão apresentada acima, bem como a taxa de crescimento t_c .

Tabela II- Parâmetros das Envoltórias das TRTs - Abertura com Correntes Capacitivas

U_r (kV _{eficaz})	u_c (kV _{pico})	t_c (kV/ μ s)
145	323	0,044
245	546	0,075
362	807	0,111
550	1226	0,168
800	1783	0,244

Fonte : FRONTIN, S. O. – P610 [2]

3 METODOLOGIA

O equacionamento do estudo é feito no domínio da frequência, obtendo-se como resposta uma função na qual será aplicada a transformada inversa de Fourier; assim, apresenta-se o resultado da TRT no domínio do tempo, podendo-se desta forma fazer a avaliação do método proposto, por comparação ao realizado por simulação temporal.

3.1 A TRANSFORMADA MODIFICADA DE FOURIER.

A elaboração dos cálculos no domínio da frequência é executada por meio da utilização da Transformada de Fourier, conforme a referência [1], no ambiente MATLAB, que é o foco principal deste trabalho.

A transformada de Fourier é definida por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

A transformada inversa de Fourier é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.2)$$

Considerando-se que: $F(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$ (3.3)

Para a transformada inversa, pode-se demonstrar que:

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} R(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (3.4)$$

ou então

$$f(t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} X(\omega) \sin(\omega t) d\omega \quad (3.5)$$

como explicado na mesma referência [1].

Assim as respostas temporais podem ser obtidas por meio das integrais, utilizando apenas a parte real de $F(\omega)$ como visto em (3.4), ou apenas a sua parte imaginária (3.5), utilizando-se a situação que for mais conveniente.

No caso de sistemas pouco amortecidos, é possível melhorar o cálculo com a aplicação de um recurso específico, que é o artifício de se multiplicar a resposta da rede no domínio do tempo pela função e^{-at} onde “ a ” é chamada de constante de estabilidade [1], constante de amortecimento [14] ou fator de convergência [15]; aplicando-se esse recurso na expressão (3.1) obtém-se (3.6):

$$F(a + j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} [f(t)e^{-at}] e^{-j\omega t} dt \quad (3.6)$$

Essa técnica de provocar artificialmente o amortecimento dos sistemas concede ao método a designação de “Transformada Modificada de Fourier” também conhecido como o método da “Transformada Numérica de Laplace” (TNL), [1] item 2.3.5 - P89, [14] e [16].

Neste cálculo, com a aplicação do recurso descrito acima, ocorre um deslocamento dos polos da função transformada, em relação ao semi-plano esquerdo.

A função anti-transformada pode então ser obtida pela expressão (3.7), onde se observa a multiplicação de um fator “ e^{at} ” que aplicado na função $f(t)$, opera a compensação apropriada, corrigindo a resposta no domínio do tempo da função $F(\omega)$ original, diga-se aquela função anterior ao uso do artifício que deslocou os polos da função transformada.

$$f(t) = \frac{e^{at}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(a + j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (3.7)$$

A avaliação numérica de $f(t)$ aqui representada por $\bar{f}(t)$, é realizada considerando-se as duas aproximações clássicas:

- a) – a limitação do intervalo de integração através do estabelecimento de uma frequência limite superior ω_m para truncar uma série infinita de termos, a fim de recompor a função no domínio do tempo; essa aproximação é responsável pelos erros de truncamento. Na fórmula abaixo 3.8, observa-se a limitação inferior da frequência no valor “zero”, obtido pelo desenvolvimento da formulação (ver fórmula 3.4), portanto não contribuindo com erros.
- b) – a discretização da variável contínua ω que é a variável independente no domínio da frequência. Essa aproximação causa os erros por amostragem, que podem ser minimizados em função do tipo de integração numérica adotada, bem como com a escolha apropriada da constante de estabilidade “ a ”. Referências [1], [14] e [15]. Neste trabalho, essa discretização é realizada através das escolhas do número de décadas (ND) utilizado, bem como pela quantidade de pontos por década (NPD), pois a escala de frequência sendo logarítmica, o seu incremento ($\Delta\omega$) é de valor variável, portanto não parametrizável.

O cálculo numérico de $f(t)$ pode ser feito com a expressão (3.4) aplicada em (3.7) chegando à expressão:

$$\bar{f}(t) = \frac{2e^{at}}{\pi} \int_0^{\omega_m} \text{Re}[F(a + j\omega)] \cos(\omega t) d\omega \quad (3.8)$$

onde $\text{Re}[F(a+j\omega)]$ é a parte real da função de $F(a+j\omega)$.

A precisão desse cálculo (3.8) depende do método de integração, do número total de pontos da escala de frequência, da frequência limite superior ω_m bem como da constante de estabilidade “ a ”.

Esse resultado, $\bar{f}(t)$ o qual representa a TRT, é comparado com o resultado dessa mesma grandeza, porém avaliado pela simulação do programa ATP no domínio do tempo como descrito no item 4 – RESULTADOS.

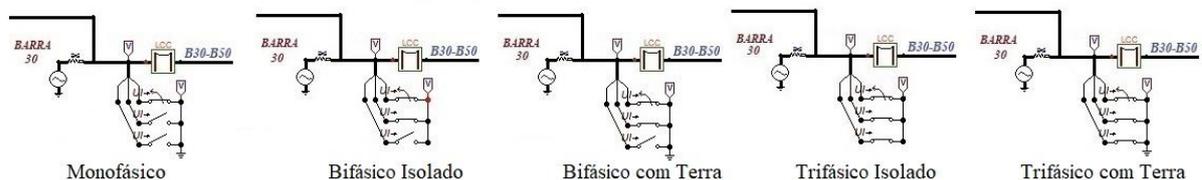
3.2 TIPOS DE FALTAS CONSIDERADAS NOS CÁLCULOS.

As faltas simuladas que serão consideradas para os cálculos das TRTs, são curtos-circuitos aplicados na Barra 30 (Figura 24- ANEXO I), dos tipos monofásico, bifásico e trifásico isolados e também com terras.

Para as aplicações dos curtos-circuitos nos casos acima mencionados, utiliza-se um disjuntor e considera-se a condição do primeiro polo a abrir, que representa uma restrição conservativa, pois conduz à situação mais severa no cálculo da TRT.

A Figura 7 apresenta esboços de aplicação dos curtos-circuitos conforme o tipo, o que define a quantidade de contatos operacionais, indicando com arcos de setas os contatos que primeiramente abrem os polos. Os contatos indicados como abertos, não são necessários no cálculo em questão.

Figura 7- Esboços de Aplicação dos Curtos-Circuitos



Fonte: Autor

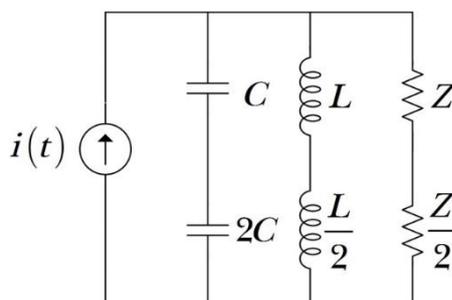
Mais informações sobre faltas nos sistemas elétricos de potência podem ser encontradas no Anexo IV.

3.3 REDE EQUIVALENTE PARA DEMONSTRAR A METODOLOGIA.

Na Figura 8, apresenta-se a rede equivalente para o cálculo da TRT no domínio da frequência, no ponto de defeito, do caso de uma falta trifásica isolada na barra no instante de abertura do primeiro polo que é tomado como modelo. Este caso de falta é bem crítico e é discutido de forma didática pela norma IEEE referência [12].

A interpretação do circuito da Figura 8 e do cálculo simplificado da TRT é feita por meio do método de injeção de corrente e do princípio da superposição que são explicados no ANEXO V.

Figura 8 - Circuito Equivalente de Curto-Circuito Trifásico Isolado na Barra



$i(t)$ fonte de corrente, C Capacitância Parasita, L Indutância do Circuito Equivalente, Z Impedância de Surto das Linhas de Transmissão

Fontes : [12]; L.C.Zanetta Jr.2003 – P583 [1]

As expressões para as diferentes faltas e aberturas simultâneas de polos de disjuntores estão apresentadas na referência [10] onde as fórmulas apresentadas têm a finalidade do cálculo da taxa de crescimento da tensão e de forma aproximada levam em conta apenas a impedância de surto das linhas de transmissão.

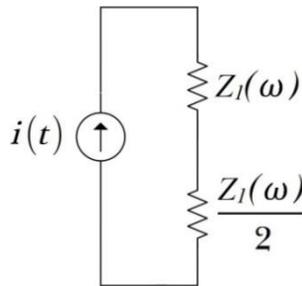
No presente trabalho, para o cálculo da TRT, é feita uma extensão da formulação apresentada em [10] na qual as impedâncias de surto Z bem como indutâncias L e as capacitâncias parasitas C passam a ser incluídas nas impedâncias do equivalente de Thévenin no local da falta, em função da frequência e denominadas por $Z(\omega)$ conforme indicadas na TABELA III. Suas expressões correspondem aos vários casos de curtos-circuitos estudados em redes tendo como pressuposto linhas de transmissão com transposição de fases; as inclusões dessas transposições nas fases representam as situações mais regularmente encontradas.

Desse modo a impedância equivalente $Z(\omega)$, reúne todos os elementos conectados à barra, como as indutâncias dos equipamentos, assim como as

impedâncias de toda a rede e linhas de transmissão, incluindo-se as propagações de ondas de todas as linhas de transmissão do sistema. Com essas inclusões no modelo restrito da referência [10] que se dedica apenas ao cálculo das taxas de crescimento da TRT (TCTRT), alcança-se a generalização que permite a realização do cálculo completo da TRT no domínio da frequência.

Assim o circuito da Figura 8, que representa o caso de uma falta trifásica isolada na barra no instante de abertura do primeiro polo, pode ser apresentado de forma mais simples conforme o circuito equivalente apresentado na Figura 9.

Figura 9- Circuito Equiv. Simplif. de Curto-Circuito Trifásico Isolado na Barra



Com $i(t)$ fonte de corrente e

$Z_1(\omega)$ Impedância de seq. positiva do equiv. de Thèvenin em função da frequência

Fontes: [12]; L.C.Zanetta Jr.2003 – P583 [1]

Para os demais casos de curtos-circuitos em estudo neste trabalho, não serão apresentados os seus circuitos equivalentes; o equacionamento para todos eles é apresentado na Tabela III abaixo, conforme o tipo de falta considerado.

Tabela III - Impedâncias do equivalente de Thévenin

Expressão conforme [10]-P43-F3.57	$Z_p(\omega) = \frac{Z_0(\omega) + 2 * Z_1(\omega)}{3}$
Impedância Equivalente para Curto-Circuito Monofásico	$Z(\omega) = Z_p(\omega)$
Impedância Equivalente para Curto-Circuito Bifásico Isolado	$Z(\omega) = 2 * Z_1(\omega)$
Impedância Equivalente para Curto-Circuito Bifásico com Terra	$Z(\omega) = Z_p(\omega) - \frac{\left(\frac{Z_0(\omega) - Z_1(\omega)}{3}\right)^2}{Z_p(\omega)}$
Impedância Equivalente para Curto-Circuito Trifásico Isolado	$Z(\omega) = 1,5 * Z_1(\omega)$
Impedância Equivalente para Curto-Circuito Trifásico com Terra	$Z(\omega) = Z_p(\omega) - 2 * \frac{Z_p(\omega) + \left(\frac{Z_0(\omega) - Z_1(\omega)}{3}\right)^2}{Z_p(\omega) + \frac{Z_0(\omega) - Z_1(\omega)}{3}}$

com $Z_1(\omega)$ Impedância de sequência positiva e $Z_0(\omega)$ Impedância de sequência zero,

Fonte: Preto P. O. [10]

3.4 SIMULAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO.

As simulações da rede são executadas com a plataforma ATP, obtendo-se a resposta da TRT no domínio do tempo e são efetuadas até um limite inferior a 4 ms; após a interrupção da corrente são nos primeiros instantes quando ocorrem os maiores esforços do ponto de vista mecânico, elétrico e térmico, e são eles os

fundamentais para o reconhecimento e avaliação dos parâmetros que definem a especificação do disjuntor [8][1][7].

O simulador é configurado conforme o detalhamento da rede modelo de caso considerada na Figura 24 do ANEXO I, são elaborados os estudos 3.4.1 e 3.4.2 abaixo.

3.4.1 AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.

Através de simulações no domínio do tempo, podem-se obter os valores de pico da corrente de curto-circuito em regime permanente, para cada um dos casos apontados no item 3.2 - Figura 7 na barra escolhida para essa análise, que são apresentados na Tabela IV. Salienta-se que a simulação no ambiente ATP foi utilizada neste trabalho para esta avaliação apenas por conveniência e praticidade, apesar de existirem outros métodos para esse propósito.

Para o cálculo dessa corrente, assim como nas simulações em geral, foram utilizados dois modelos de linhas de transmissão:

- ✓ Bergeron: utiliza parâmetros constantes de KC Lee ou Clark,
- ✓ JMarti: é um modelo dependente da frequência com a matriz de transformação constante. [17]

Esses valores de corrente são utilizados nos cálculos da TRT através do método da TNL como são vistos no item 3.5 da fórmula (3.10).

Na tabela IV observa-se que os maiores valores de corrente de pico correspondem aos curtos-circuitos trifásicos, independentemente de serem isolados ou com terra; a seguir encontra-se o curto-circuito bifásico com terra seguido pelo bifásico isolado e por último o curto-circuito monofásico.

Tabela IV- Valores de pico da corrente de curto-circuito

Tipo de Falta	$I_M =$ Valores de Pico da Corrente cc (A)	
	Modelos de Linha:	
	Bergeron	J. Marti
Trifásica Isolada	21340	21346
Trifásica com terra	21340	21346
Bifásica com terra	19849	19836
Bifásica Isolada	18481	18486
Monofásica	16364	16390

Curtos-Circuitos na barra número #30

Fonte: Autor - Valores obtidos das simulações

Também se conclui que a escolha dos modelos de linha Bergeron ou JMarti para as simulações, pouco influi nos valores de pico das correntes de faltas, com variação máxima de 0,16%, pois os valores da corrente são calculados em regime permanente, na frequência nominal de 60 Hz.

3.4.2 OBTENÇÃO DA TRT NO DOMÍNIO DO TEMPO.

A plataforma ATP é utilizada no domínio do tempo para a obtenção da TRT, necessita de uma escala com a fixação de um intervalo de tempo Δt para apresentação dos resultados.

Para se avaliar a variação na apresentação dos resultados, são especificados dois incrementos de tempo (Δt) que também são utilizados nos cálculos do item 3.5 abaixo:

$$\Delta t_a = 1 \mu s \quad e \quad \Delta t_b = 10 \mu s$$

São feitas as simulações com os parâmetros sendo configurados conforme as especificações acima nos casos de curtos-circuitos considerados, obtendo-se as respostas das TRTs no domínio do tempo em gráficos apresentados no item 4.

3.5 CÁLCULOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A TRT no domínio da frequência pode ser escrita como:

$$V_s(\omega) = I_s(\omega) \cdot Z(\omega) \quad (3.9)$$

Onde:

$Z(\omega)$ é a impedância equivalente no ponto do defeito em função das frequências consideradas, cujo valor obtido depende do tipo de falta em estudo.

e

$I_s(\omega)$ é a transformada de Fourier da corrente que no domínio do tempo pode ser definida por :

$$i(t) = I_M \text{ sen } \omega t \quad (3.10)$$

Onde I_M é a amplitude da corrente de curto-circuito do caso considerado, apontada na TABELA IV – Item 3.4.1 acima. Com essas considerações, a expressão da corrente de curto-circuito no domínio da frequência $I_S(\omega)$ fica disponível.

Resumindo-se o que foi conceituado acima, para a realização do cálculo da TRT no domínio da frequência, além da corrente de curto-circuito é necessário também o conhecimento da impedância equivalente $Z(\omega)$, ambas no domínio da frequência.

No tópico 3.5.1 abaixo, é proposto um método prático para o cálculo da impedância equivalente.

3.5.1 IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE NO PONTO DO DEFEITO.

Para a obtenção da impedância equivalente da rede no local onde é apresentada a falta, utiliza-se o programa ATP, para as simulações da rede modelo apresentada no Anexo I que é o estudo de caso deste trabalho, desenvolvidas no domínio da frequência, para os casos de faltas considerados, com a finalidade de se obterem duas informações necessárias à composição das impedâncias equivalentes $Z(\omega)$, como podem ser observadas na TABELA III: $Z_0(\omega)$ que representa a impedância de sequência zero e $Z_1(\omega)$ que representa a impedância de sequência positiva.

Cabe lembrar que a resposta $Z(\omega)$ pode ser obtida de forma independente do programa ATP, havendo outros aplicativos que executam essa tarefa. Outra possibilidade é a elaboração de um programa para o cálculo de $Z(\omega)$, o que deverá ser feito em investigações futuras.

Os cálculos para obtenção da impedância equivalente no domínio da frequência $Z(\omega)$, para os casos de curto-circuito considerados são executados neste trabalho primeiramente em uma extensão de 7 décadas desde 0,1 Hz a 1,0 MHz. Com a finalidade de se apreciar a redução na precisão do resultado final, outros cálculos são feitos em uma faixa espectral reduzida de 4 décadas desde 1 Hz a 10 kHz.

3.5.2 CÁLCULO DA TRT PELO MÉTODO DA TNL.

Uma vez obtida a impedância equivalente $Z(\omega)$, e pela expressão (3.9) calcula-se o valor de $V_s(\omega)$.

Utilizando a expressão (3.8), bem como fazendo as devidas substituições obtém-se:

$$\bar{v}(t) = \frac{2e^{at}}{\pi} \int_0^{\omega_m} \text{Re}(V_s(a + j\omega)) \cos(\omega t) d\omega \quad (3.11)$$

Desta forma, utilizando-se a expressão (3.11), calcula-se $v(t)$ que representa a TRT desejada, por meio de solução numérica $\bar{v}(t)$ através da integração trapezoidal.

Foram elaborados os cálculos numéricos com diferentes passos de integração através de diferentes números de pontos por década (NPD), bem com diferentes números de décadas (ND) no domínio da frequência.

Para a escala de tempo, a fim de se estabelecer uma comparação da apresentação das respostas entre os dois métodos, itens 3.4 e 3.5, foram utilizados os mesmos dois incrementos de tempo Δt_a e Δt_b especificados em 3.4.2.

Com as considerações acima, são feitos os cálculos e os resultados obtidos em

três níveis de precisões: (\mathbf{N}_{p1}), (\mathbf{N}_{p2}) e (\mathbf{N}_{p3}). Onde:

i. \mathbf{N}_{p1} :

com $N_{PDa} = 8000$ NPD (pontos por década), para $N_{Da} = 7$ ND (número de décadas) analisadas, e com incremento de tempo $\Delta t_a = 1 \mu s$,

ii. \mathbf{N}_{p2} :

com $N_{PDa} = 8000$ NPD (pontos por década), para $N_{Db} = 4$ ND (número de décadas) analisadas, e com incremento de tempo $\Delta t_a = 1 \mu s$,

iii. \mathbf{N}_{p3} :

com $N_{PDb} = 800$ NPD (pontos por década), para $N_{Da} = 7$ ND (número de décadas) analisadas, e com incremento de tempo $\Delta t_b = 10 \mu s$,

O nível mais alto de precisão obtido nos resultados, como pode ser visto acima é aquele obtido com o cálculo utilizando-se o nível de precisão \mathbf{N}_{p1} e também é o que demanda maior quantidade de recursos computacionais.

Utilizando-se as configurações descritas acima, as simulações são executadas para os dois modelos de linha, Bergeron e J Marti, nos casos de faltas já assinalados no item 3.2.

Foi desenvolvido um programa no ambiente MATLAB para o cálculo da expressão (3.11) segundo o método de injeção de correntes e o princípio da superposição. Anexo V e referência [1].

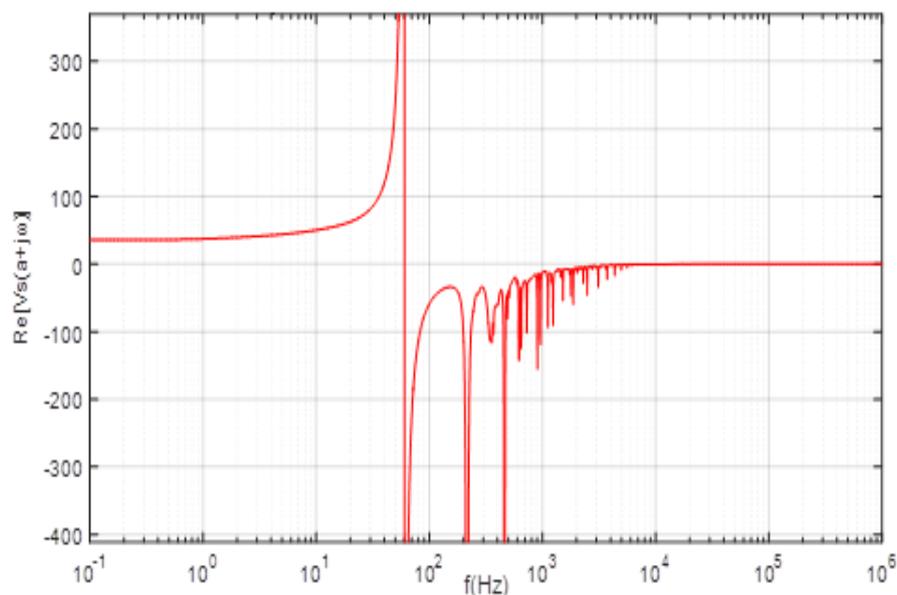
3.6 A TRT NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A fim de mostrar a equivalência existente entre os dois métodos para o cálculo da TRT apresentados nos itens 3.4.2 (no domínio do tempo) e 3.5.2 (no domínio da frequência), utilizando a rede modelo de caso da Fig 24 do ANEXO I, simula-se um curto-circuito monofásico na barra #30, utilizando a precisão de cálculo N_{p1} e as linhas de transmissão modeladas segundo J.Marti. Com essa simulação, obtém-se a impedância equivalente da rede elétrica no ponto onde foi estabelecido o curto-circuito.

Com a impedância equivalente, o valor de pico da corrente de curto-circuito (obtido conforme o item 3.5.1), calcula-se segundo a expressão 3.9 a primeira parte da função integrando da expressão 3.11, que representa a Parte Real da Função $V_s(a+j\omega)$; em outros termos ela representa a TRT no domínio da frequência que é apresentada na forma de gráfico em duas escalas:

- a Figura 10 em escala lin x log, representa a parte real da TRT no domínio da frequência.

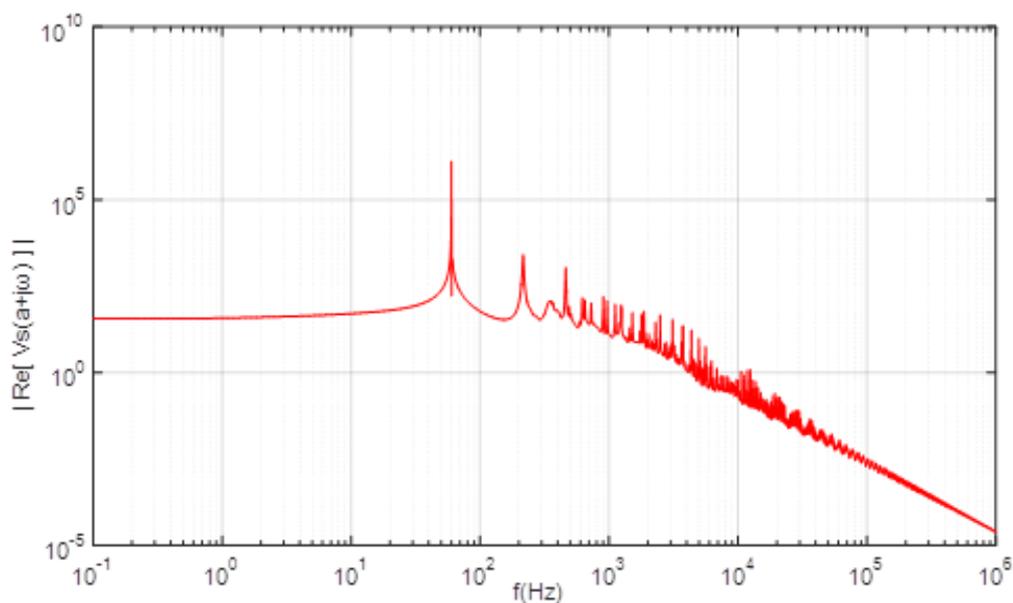
Figura 11 - Parte Real da Função $V_s(a+j\omega)$



Fonte: Autor

- a Figura 12 em escala log x log, representa o valor absoluto da parte real da TRT no domínio da frequência.

Figura 13 - Valor Absoluto da Parte Real da Função $V_s(a+j\omega)$



Fonte: Autor

Observando-se as figuras 10 e 11 podem-se extrair as seguintes informações conclusivas:

- as frequências inferiores, neste exemplo abaixo de 10 Hz, fazem essa função tender a um valor constante. A integração entre 0,1 e 10 Hz pode ser obtida de uma forma simples: a área do retângulo sob a curva;
- os maiores valores em módulo dessa função estão nas vizinhanças da frequência 60 Hz. Observa-se que na faixa de 10 a 10000 Hz, localiza-se a região do espectro que maior contribuição oferece ao resultado final, podendo

a função ser integrada pelo método numérico escolhido, neste caso o trapezoidal;

- c)** nas frequências altas, notadamente neste exemplo acima de 10 KHz, observa-se que essa função tende rapidamente para um valor bem pequeno. Assim o valor da sua integração será desprezível quando a frequência tende ao valor do limite superior arbitrado ω_m .

A composição dessas parcelas que correspondem às três regiões do espectro, representa a TRT no domínio da frequência $V_s(a+j\omega)$ que, após a aplicação da anti-transformada tem como resultado a TRT no domínio do tempo.

4 RESULTADOS

A fim de se apresentar o método do cálculo da TRT no domínio da frequência, foi desenvolvida uma rede elétrica hipotética à qual se convencionou chamar de rede modelo de análise.

A rede modelo de análise é apresentada na Figura 24 do ANEXO I; ela representa uma típica rede elétrica de um sistema de potência, para o estudo dos casos de falta considerados, que são os cálculos de todos os tipos de curtos-circuitos deste trabalho.

Essa rede genérica contém vinte e quatro linhas de transmissão que fazem as conexões entre as catorze barras com os respectivos geradores que estão separados por distâncias de até centenas de quilômetros.

Os modelos utilizados para as linhas são os disponíveis no Programa ATP e conhecidos como Bergeron e JMarti. As linhas são consideradas perfeitamente transpostas, o que é uma hipótese usual de cálculo de TRT, no entanto isso não é uma restrição da metodologia para o cálculo. Neste caso, os cálculos tradicionais de sequência positiva e zero podem ser aproveitados na construção dos modelos em função da frequência.

Cabe ainda lembrar que o modelo JMarti leva em consideração a dependência dos parâmetros com a frequência, propiciando uma representação mais precisa para valores de frequências acima da nominal da rede.

Salienta-se que a representação da rede pode ser a mais precisa possível, incluindo a variação dos parâmetros com a frequência, na representação de modelos de linhas de transmissão.

Outro aspecto a ser mencionado é que nos programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos as linhas de transmissão são modeladas por meio de algumas aproximações de modelos, na sua representação [18][19].

Com o tratamento feito no domínio da frequência, essas aproximações podem

ser melhoradas e as imprecisões do processo numérico de inversão podem ser minimizadas pela escolha adequada dos parâmetros numéricos para a obtenção da solução satisfatória.

As avaliações das TRTs para os casos de falta considerados, na rede modelo descrita acima, foram elaboradas utilizando:

- O programa ATP para análise de transitórios eletromagnéticos, configurado para operar no domínio do tempo que é o método tradicionalmente empregado e neste trabalho utilizado para comparação dos resultados (Item 3.4.2).
- O Cálculo pela Transformada Numérica de Laplace – TNL como descrito no Item 3.5.2.

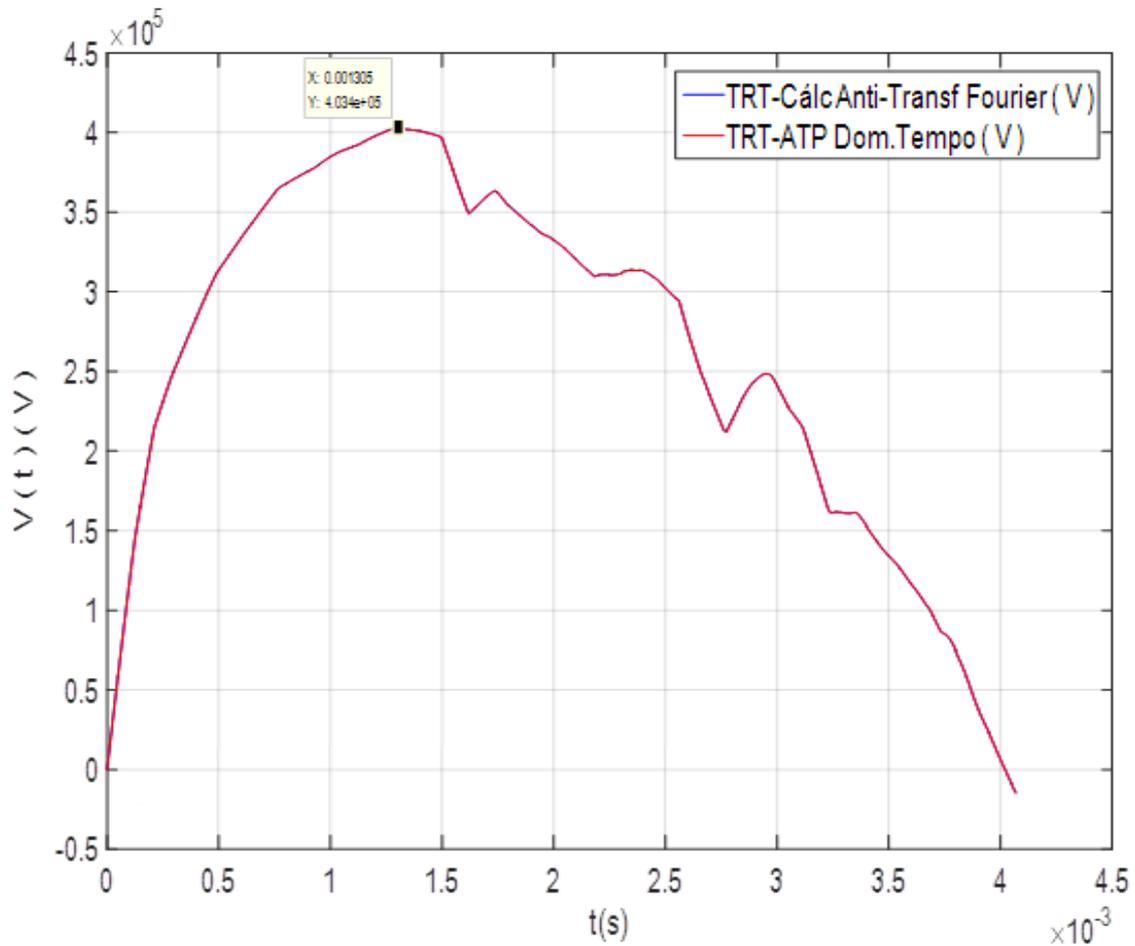
Foram dispostas num mesmo gráfico as respostas dos dois métodos utilizados.

Salienta-se que os gráficos das TRTs apresentados, estão com os sinais invertidos para facilidade de visualização e interpretação dos resultados.

4.1 CASO DE CURTO-CIRCUITO MONOFÁSICO

Na Figura 12, a resposta do cálculo efetuado com a precisão N_{p1} , para o curto-circuito monofásico na barra 30 (Figura 24) com as linhas representadas pelo modelo Bergeron, observa-se ajuste entre as curvas obtidas nos dois cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 .

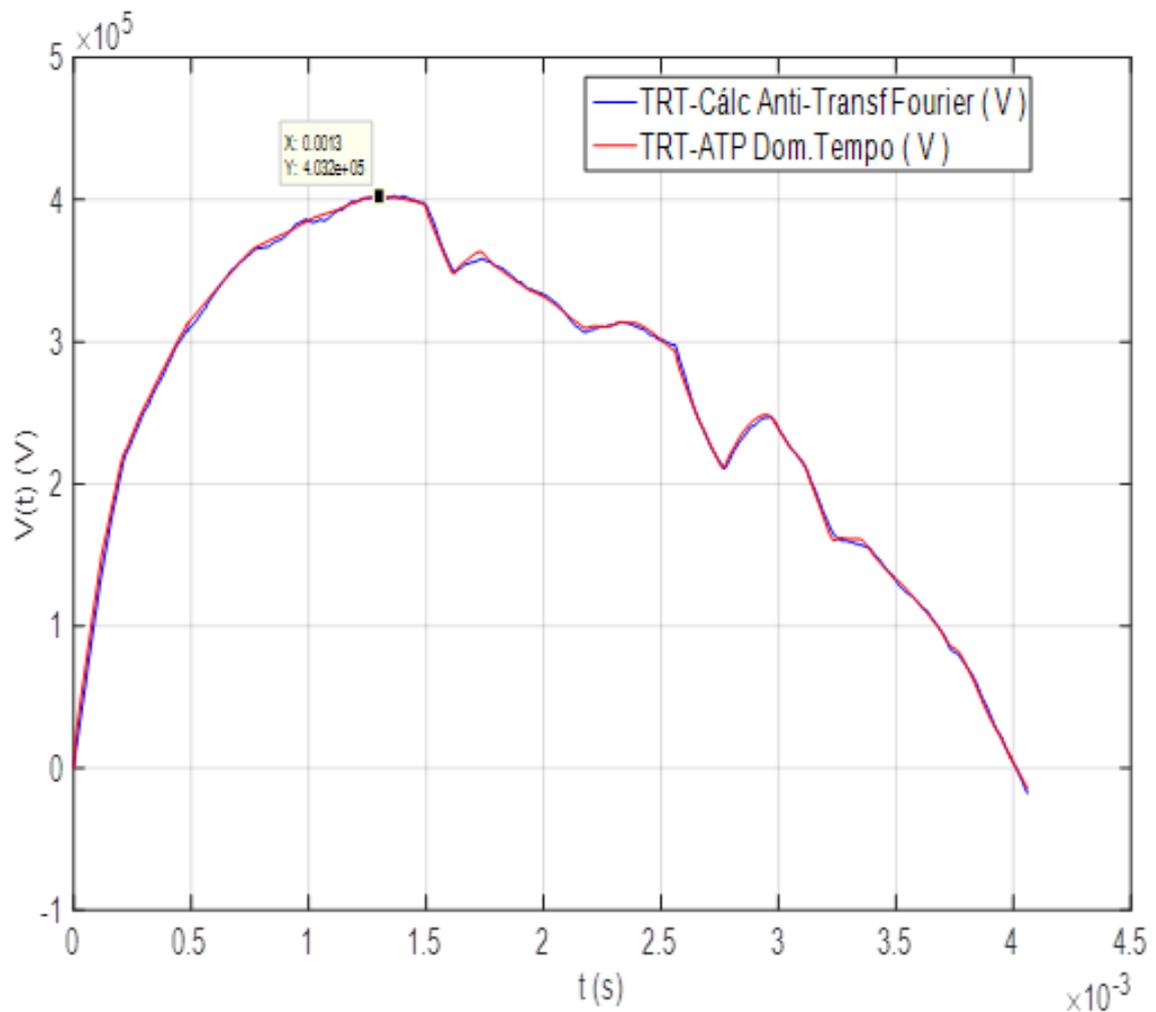
Figura 14- Curto-Circuito Monofásico - B30 – L. Mod. Berg - N_{p1}



Fonte: Autor

Na Figura 13 tem-se a resposta do mesmo cálculo acima, Figura 12, porém efetuado com menor precisão N_{p3} , como explicado no item 3.5.2, e observa-se ainda um bom ajuste entre as curvas. Neste cálculo o máximo desvio observado é de 3,31% nas extremidades da curva, devido a um atraso na resposta temporal, no entanto o comportamento é muito próximo e o desvio no valor de pico é de apenas 0,57%.

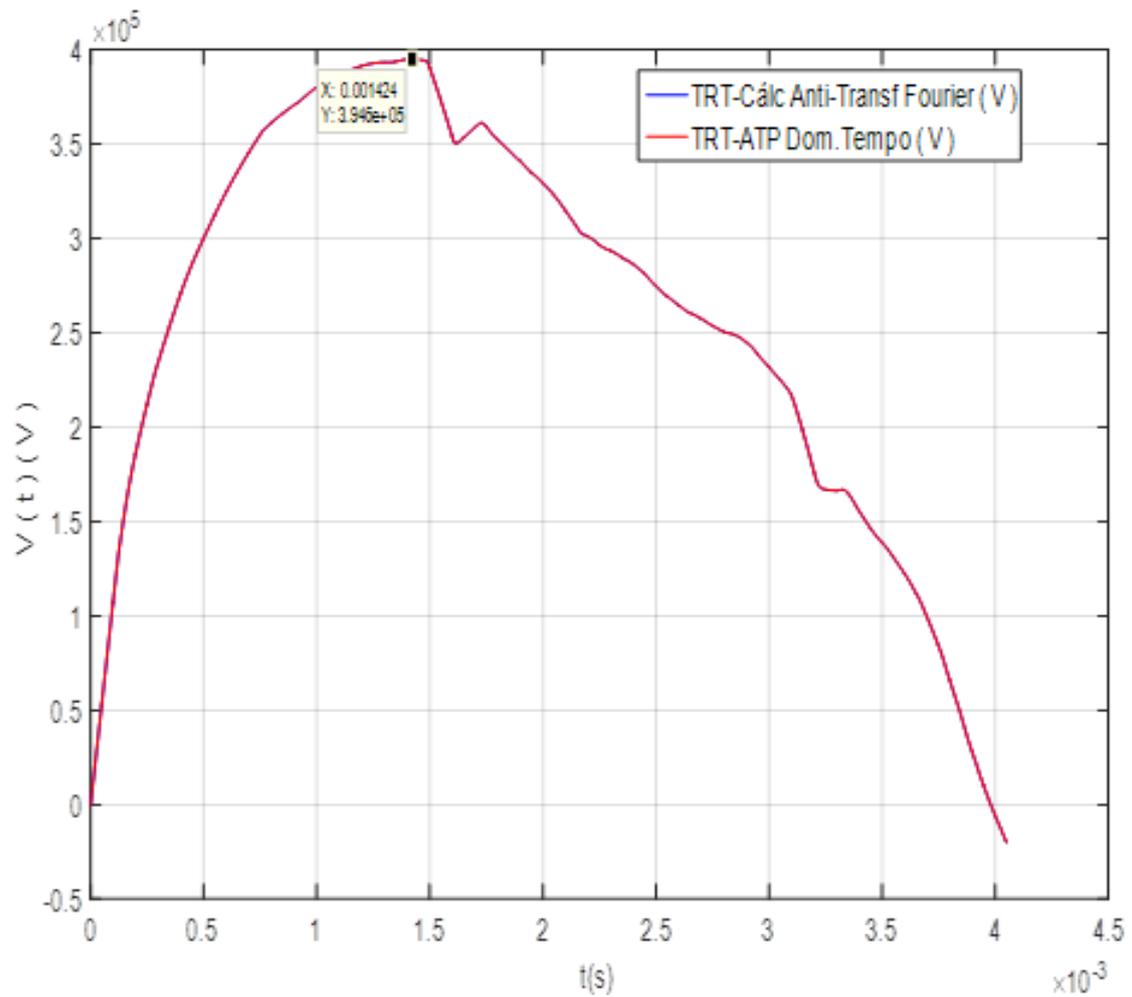
Figura 15 - Curto-Circuito Monofásico - B30 – L. Mod. Berg. - caso N_{p3}



Fonte: Autor

Na Figura 14, se obtém a resposta do cálculo efetuado com maior precisão (N_{p1}), com modelagem das linhas segundo modelo J.Marti para o curto-circuito monofásico na barra 30. Observa-se bom ajuste entre as curvas obtidas nos dois cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 e o máximo desvio observado é de 0,1% nas extremidades do gráfico.

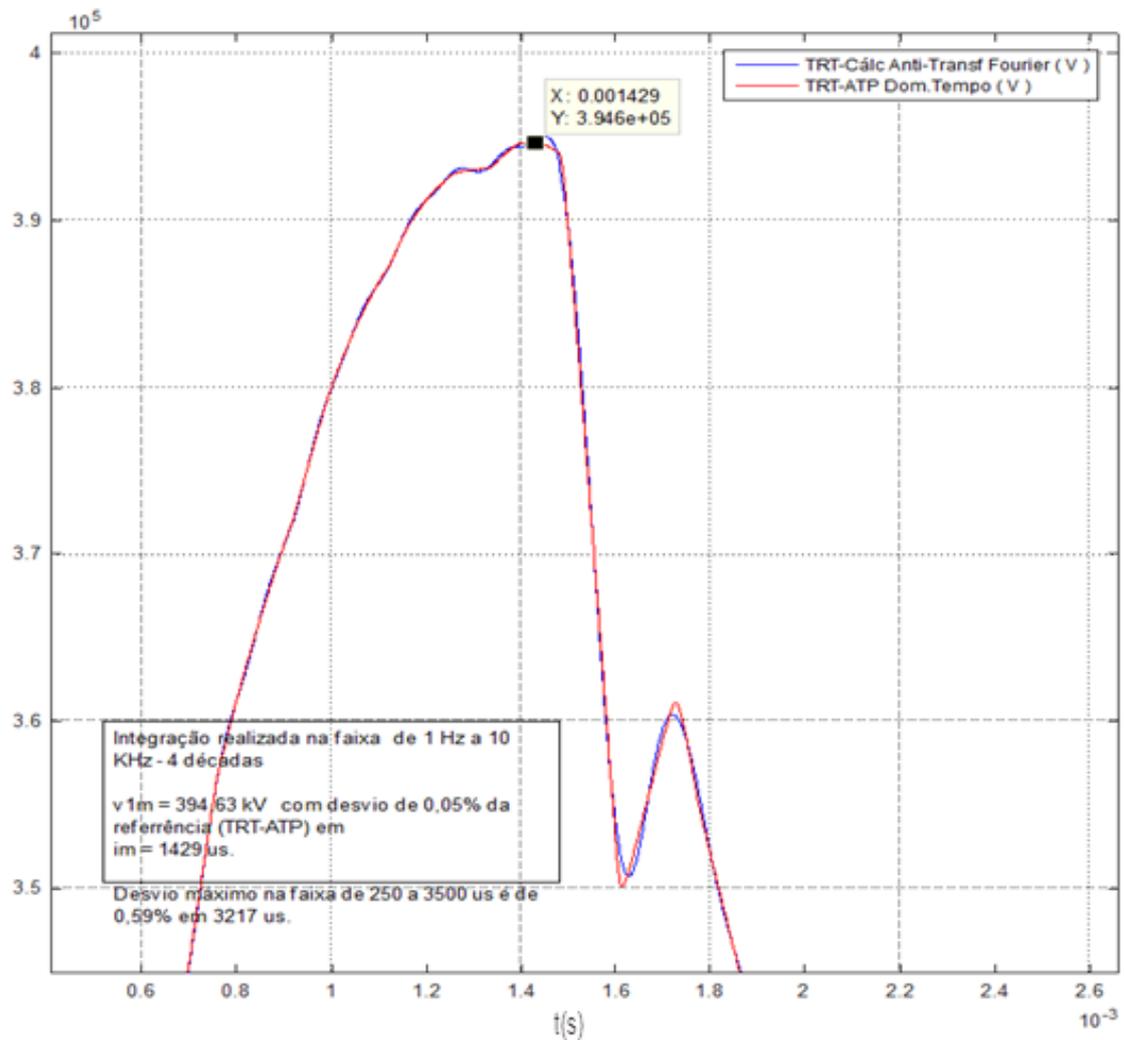
Figura 16- Curto-Circuito Monofásico - B30 - L. Mod. J. Marti - N_{p1}



Fonte: Autor

Na Figura 15, se obtém a resposta do cálculo efetuado com menor precisão (N_{p2}), com modelagem das linhas segundo modelo J.Marti para o curto-circuito monofásico na barra 30. Observa-se ótimo ajuste entre as curvas obtidas nos dois cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 e o máximo desvio observado é de +0,05% no pico do gráfico.

Figura 17- Curto-Circuito Monofásico - B30 – L. Mod. J. Marti – N_{p2}



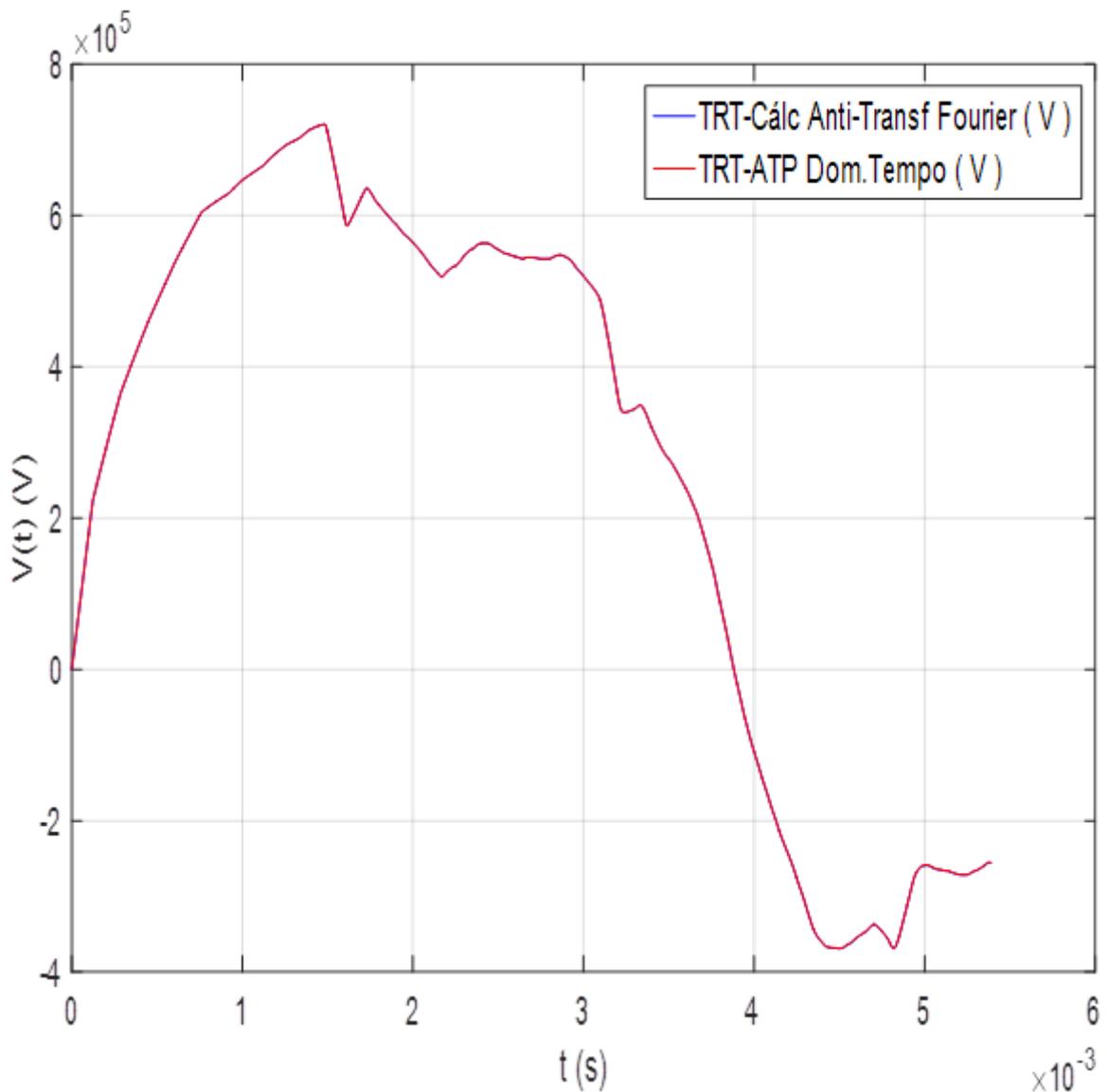
Fonte: Autor

Obs. : Na figura 15 observa-se uma ampliação da escala do tempo. Ela faz um detalhamento do pico da TRT em uma janela de largura $1200 \mu\text{s}$ aproximadamente.

4.2 CASO DE CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO ISOLADO – TRT

Na Figura 16 tem-se uma comparação entre os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito bifásico isolado na barra 30 com linhas modelo J.Marti efetuado com precisão (N_{p1}), com um desvio máximo observado de 0,13%.

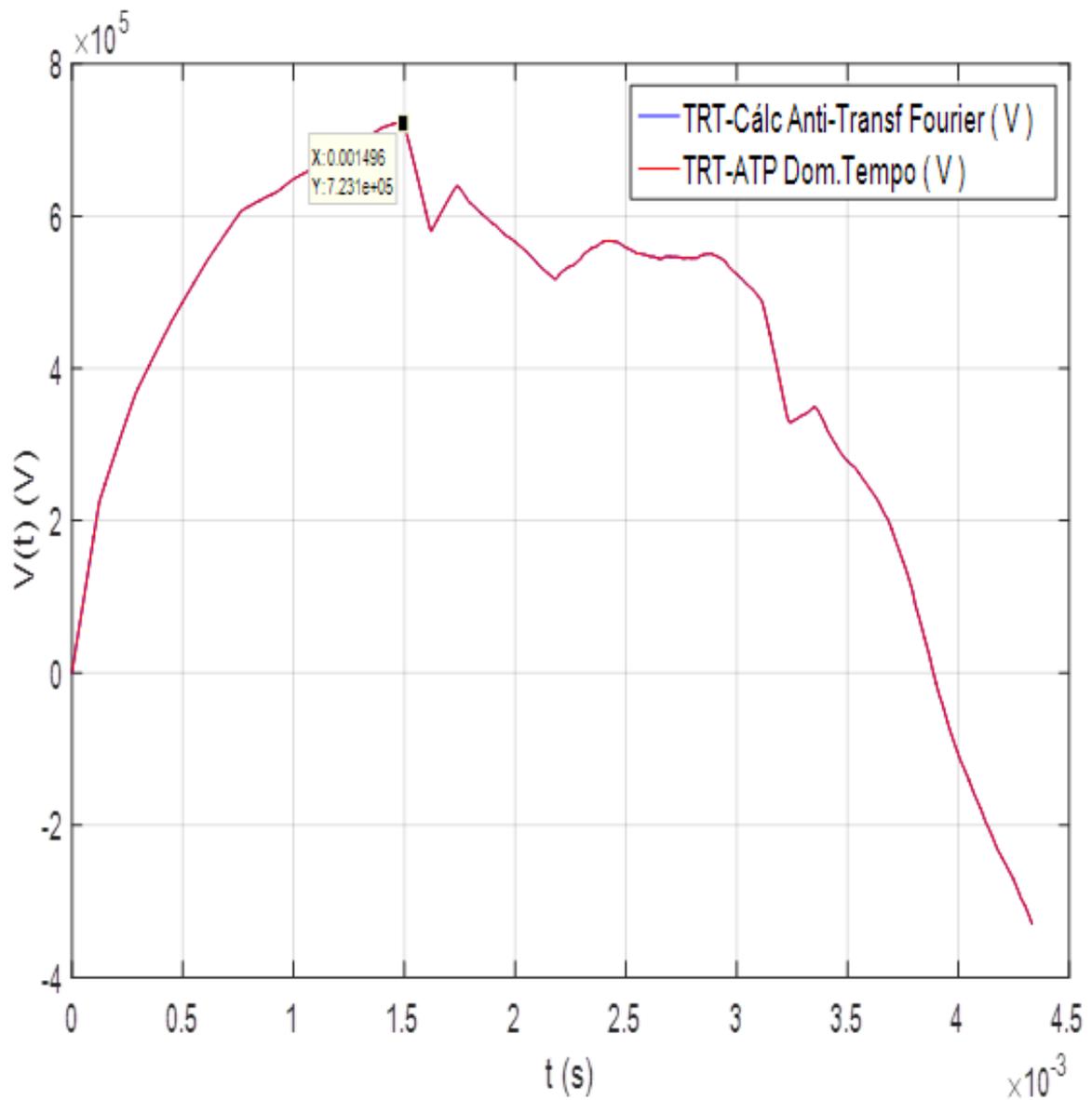
Figura 18- Curto-Circuito Bifásico Isolado- B30 - L modelo J. Marti – N_{p1}



Fonte: Autor

Na Figura 17 tem-se uma comparação entre os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito bifásico isolado na barra 30 com linhas modelo Bergeron efetuado com precisão N_{p1} , com um desvio máximo observado de 0,15%.

Figura 19- Curto-Circuito Bifásico Isolado - B30 - L. Mod. Berg. - N_{p1}

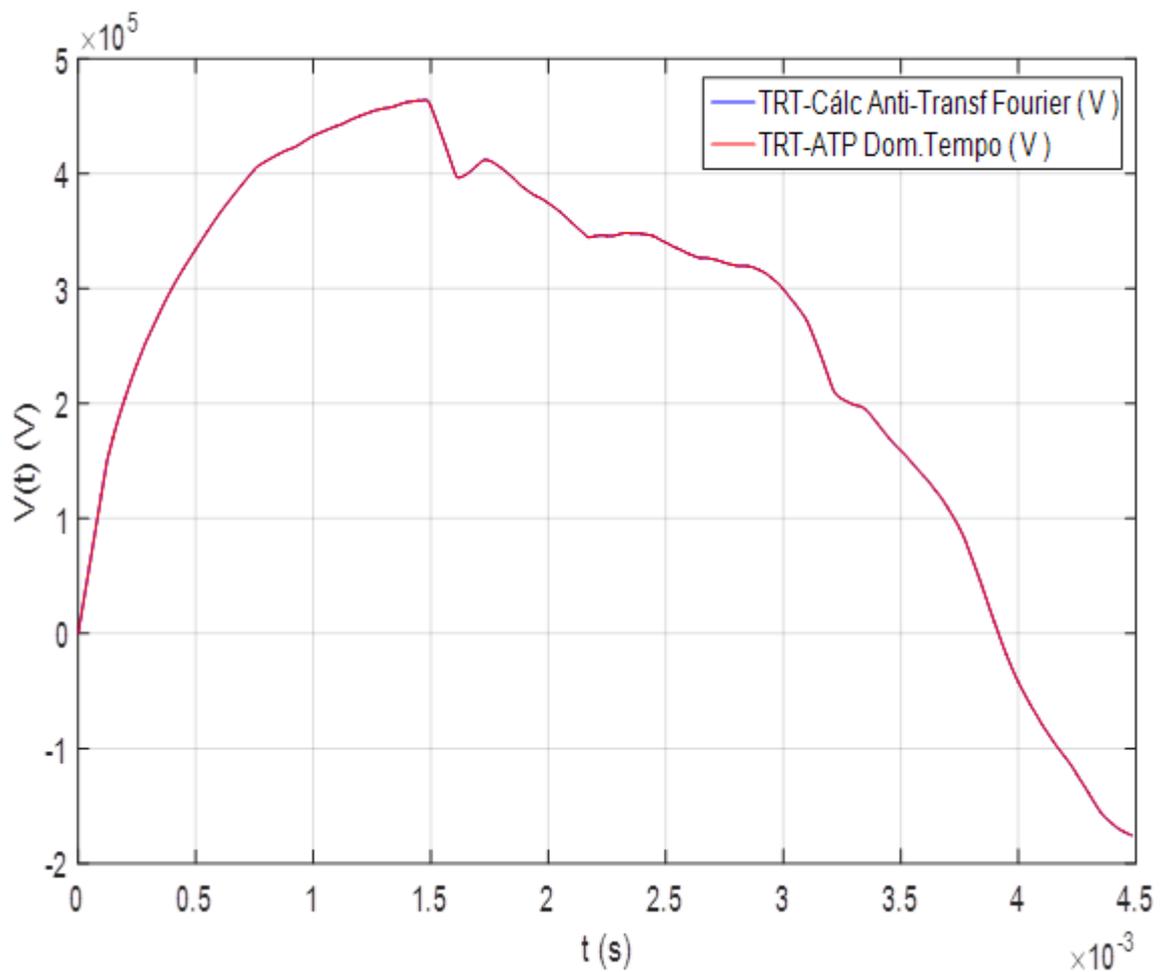


Fonte: Autor

4.3 CASO DE CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO COM TERRA – TRT

Na Figura 18 comparam-se os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito bifásico com terra na barra 30, no modelo J.Marti efetuado com precisão N_{p1} , com um desvio máximo observado de 0,06%.

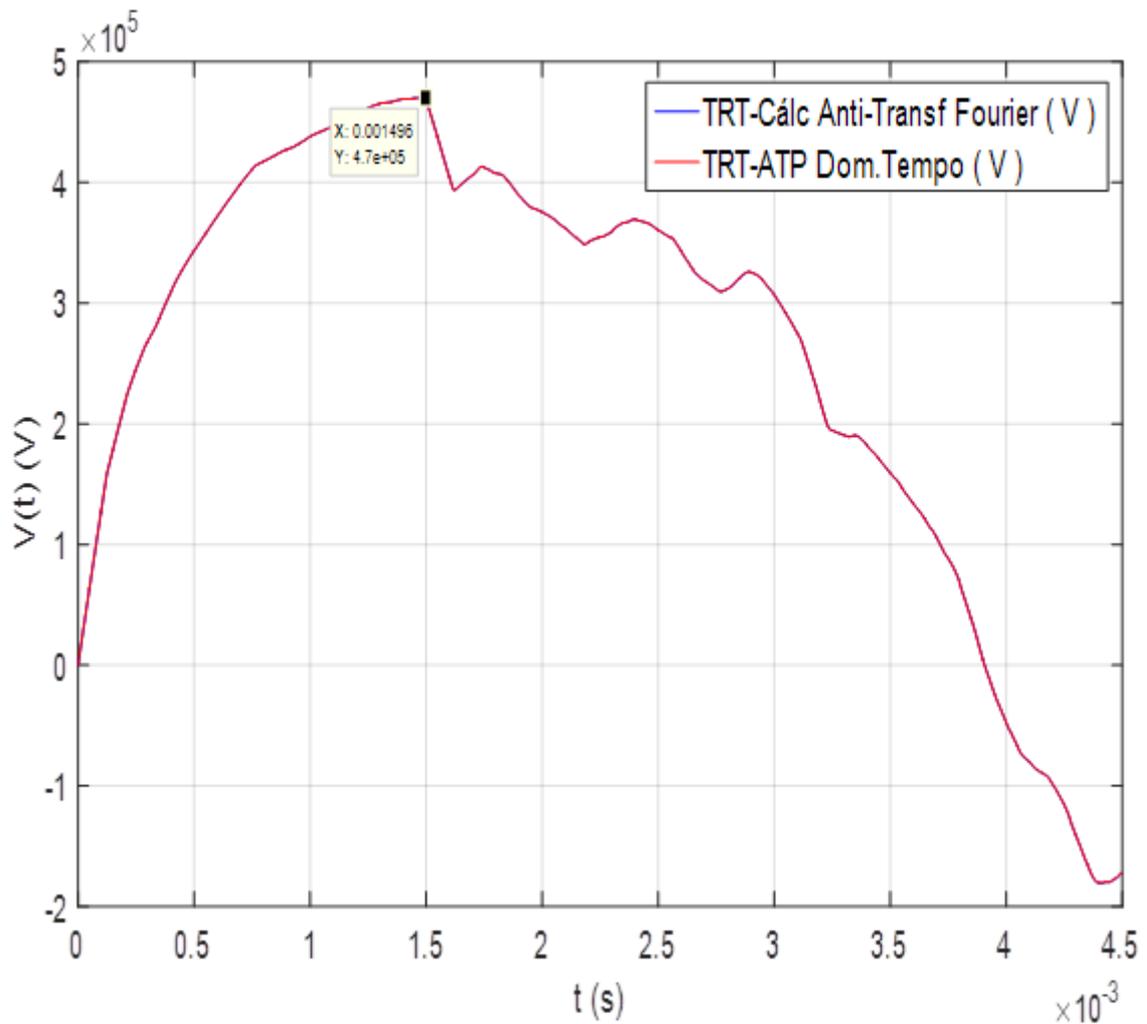
Figura 20- Curto-Circuito Bifásico com Terra - B30 - L. Mod. J. Marti - N_{p1}



Fonte: Autor

Na Figura 19 comparam-se os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito bifásico com terra na barra 30, no modelo Bergeron efetuado com precisão (N_{p1}), com um desvio máximo observado de 0,24%.

Figura 21- Curto-Circuito Bifásico com Terra - B30 - L. Mod. Berg. - N_{p1}

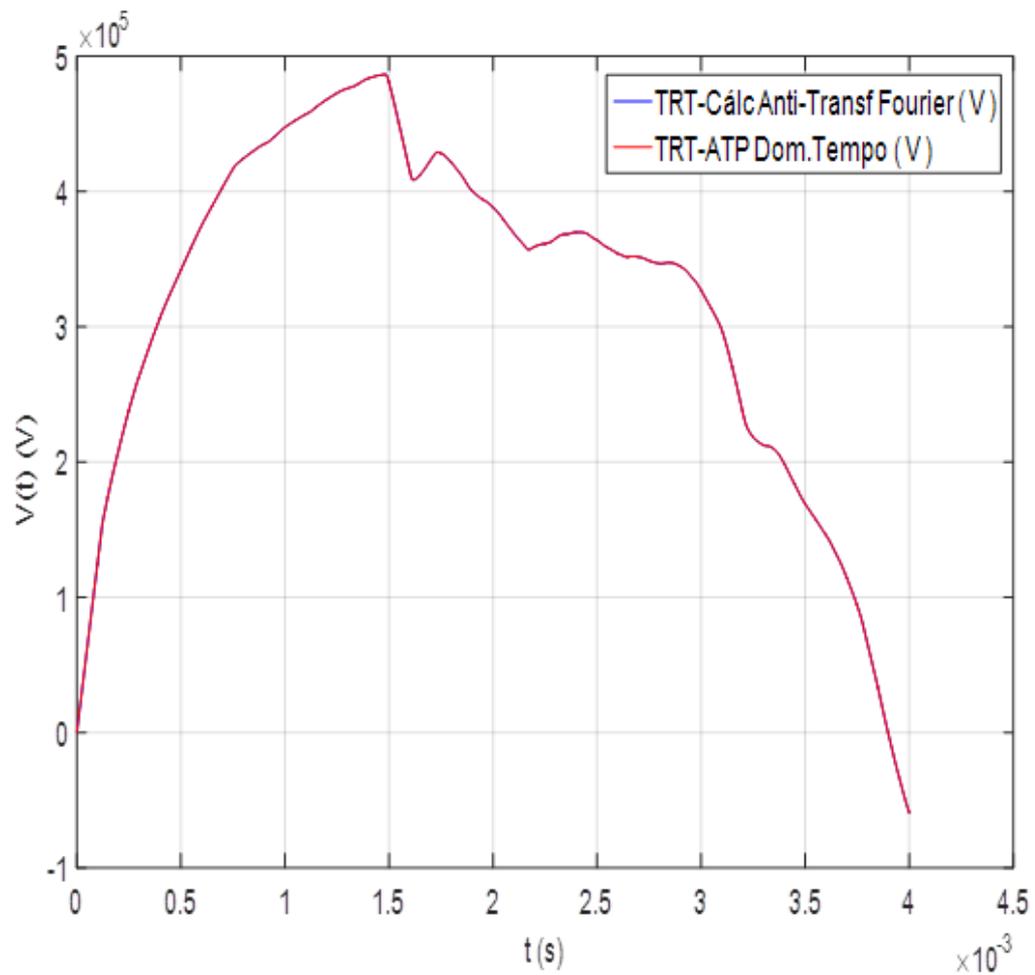


Fonte: Autor

4.4 CASO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO COM TERRA – TRT

Na Figura 20 comparam-se os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito Trifásico com terra na barra 30, no modelo J.Marti efetuado com precisão (N_{p1}), com um desvio máximo observado de 0,12%.

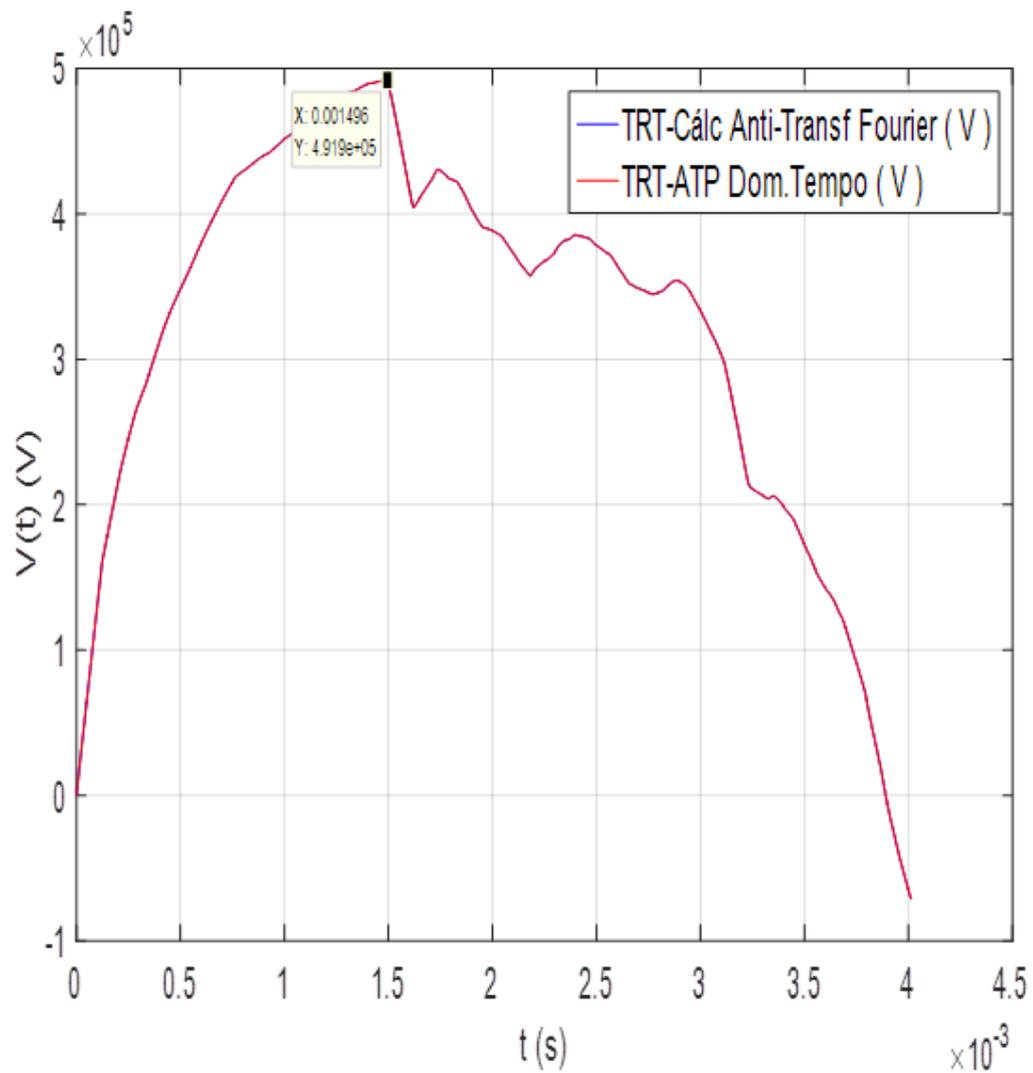
Figura 22- Curto-Circuito Trifásico com Terra - B30 - L. Mod. J. Marti - N_{p1}



Fonte: Autor

Na Figura 21 comparam-se os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito Trifásico com terra na barra 30, no modelo Bergeron efetuado com precisão N_{p1}, com um desvio máximo observado de 0,12%.

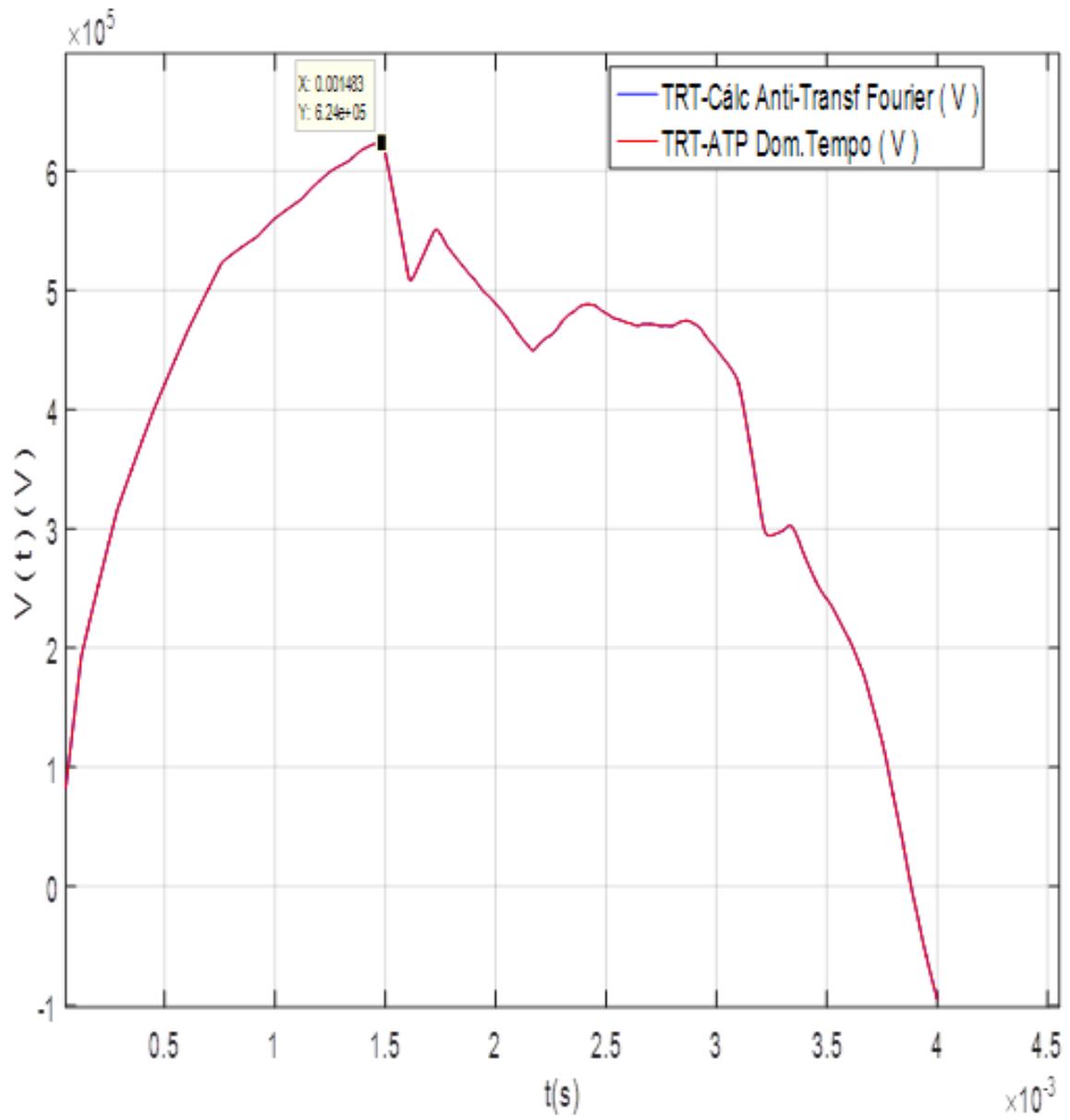
Figura 23- Curto-Circuito Trifásico com Terra - B30 - L. Mod. Berg. - N_{p1}



Fonte: Autor

4.5 CASO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO ISOLADO – TRT

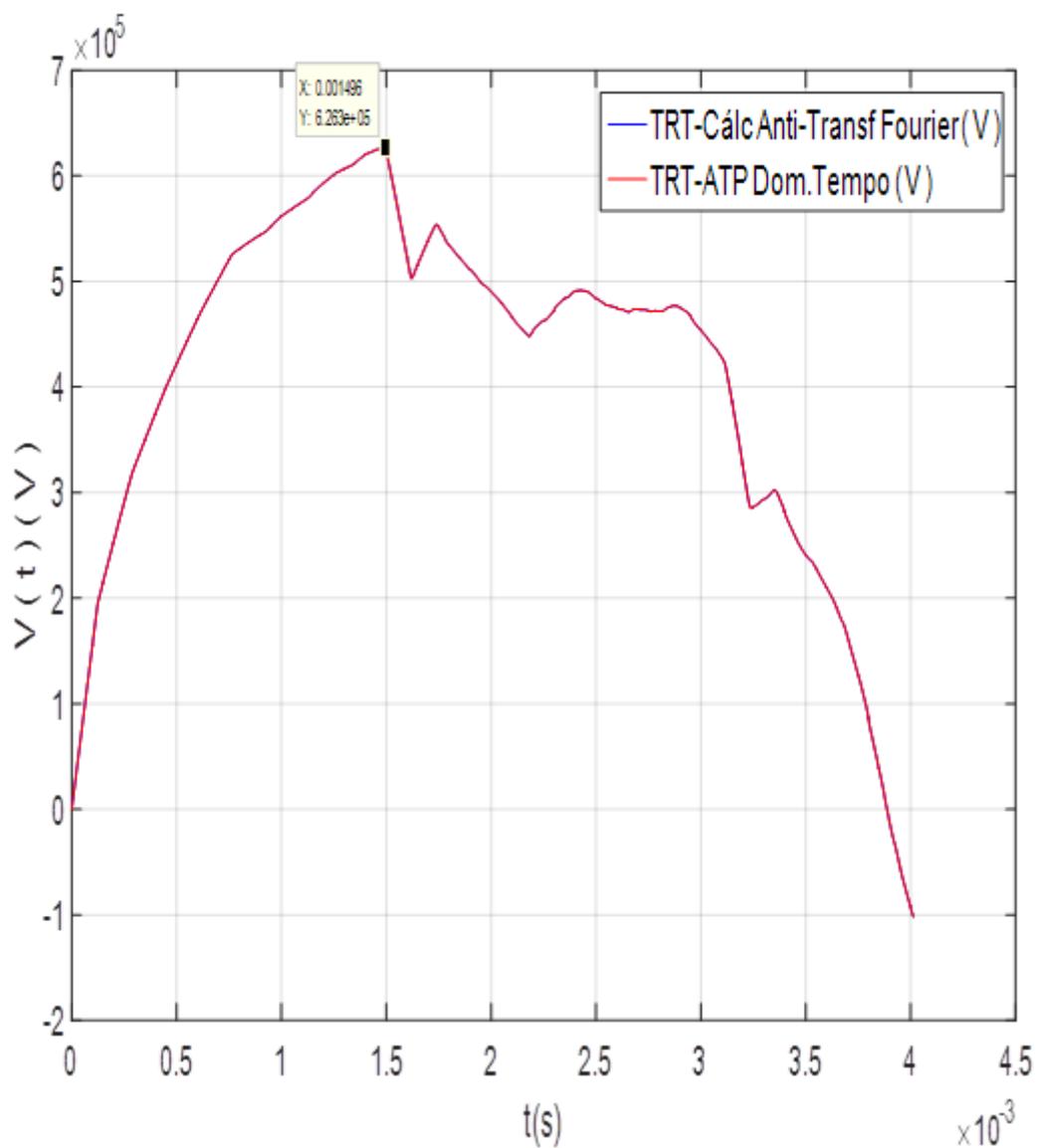
Na Figura 22 vê-se uma comparação entre os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito trifásico isolado na barra 30, modelo J.Marti efetuado com precisão N_{p1}, com um desvio máximo observado de 0,17%.

Figura 24- Curto-Circuito Trifásico Isolado - B30 - L. Mod. J. Marti - N_{p1}

Fonte: Autor

Na Figura 23 vê-se uma comparação entre os cálculos ATP item 3.4.2 e TNL item 3.5.2 de curto-circuito trifásico isolado na barra 30, modelo Bergeron efetuado com precisão N_{p1} , com um desvio máximo observado de 0,14%.

Figura 25- Curto-Circuito Trifásico Isolado - B30 - L. Mod. Berg. - N_{p1}



Fonte: Autor

4.6 MÁXIMOS VALORES DA TRT OBTIDOS NOS CÁLCULOS

A Tabela V resume os valores máximos da TRT obtidos com os modelos de linha (Bergeron / J.Marti), cujos cálculos são efetuados com a maior precisão (N_{p1}).

Constata-se na Tabela V que as diferenças dos valores entre modelos de linha são levemente mais elevadas no caso monofásico, com maior envolvimento da sequência zero, com um desvio máximo de 2,17%, o que pode ser justificado pelo comportamento do modelo JMarti que leva em conta a variação dos parâmetros de sequência zero com a frequência. Já para os casos de curtos-circuitos trifásicos, a proximidade dos resultados é maior, com um desvio máximo de 1,08% (Trifásico com terra), devido ao efeito preponderante da sequência positiva, que é menos impactada pela variação de frequências.

Tabela V- Valores de pico da TRT obtidos nos cálculos

Tipo de Falta: Curto-Circuito...	TRT _{pico} (KV)	
	Modelos de Linha	
	Bergeron	J. Marti
Bifásico Isolado	723,13	720,47
Trifásico Isolado	626,25	623,95
Trifásico com terra	491,92	486,61
Bifásico com terra	469,97	463,71
Monofásico	403,39	394,63

Fonte: Autor

4.7 PRECISÃO DOS CÁLCULOS

Investiga-se qual é a precisão que se obtém no resultado final do cálculo da TRT no domínio da frequência em função dos parâmetros de cálculo pertinentes, e são definidos os níveis de precisão: N_{p1} , N_{p2} e N_{p3} .

Para essa avaliação, comparam-se os resultados de cálculos numéricos quando são alterados os seguintes parâmetros:

- a quantidade total das décadas para cálculo, variando dessa forma o tamanho da faixa de frequências a ser computada. Como consequência a magnitude dos erros de truncamento será alterada,
- o número de pontos por década para a faixa de frequências escolhida. Com isso a magnitude dos erros por amostragem na escala de frequência é alterada,
- o incremento de tempo para a recomposição da TRT no domínio do tempo durante a aplicação da anti-transformada. Isso implica em uma alteração na magnitude dos erros de amostragem na escala do tempo.

Pelo gráfico da Figura 12, que é o cálculo da TRT com corrente de Curto-Circuito Monofásico - Linha Modelo J.Marti com precisão N_{p2} , que representa a redução no cálculo de sete para quatro décadas de integração (entre 1Hz a 10 KHz), não representa redução significativa na precisão do resultado final, mantendo-o ainda bem aceitável; o máximo desvio observado é de 0,05% no pico do gráfico

Com isso pode-se afirmar que, mesmo não se dispondo de programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos é possível efetuar o cálculo da TRT e especificar corretamente o disjuntor.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise da viabilidade do cálculo da TRT para todos os tipos de faltas, no domínio da frequência, estendendo as formulações apresentadas por Preto, P. O. [10], que foram desenvolvidas apenas para o cálculo da TCTRT.

Apresenta-se um método de cálculo da TRT no domínio da frequência que pode ser efetuado sem o auxílio de programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos, para todos os tipos de faltas, sendo discutidos os casos exemplificados para curtos-circuitos na barra: trifásico, bifásico com e sem terra e curto-circuito monofásico na barra.

Foi constatada a viabilidade de aplicação da transformada modificada de Fourier, com excelente precisão nas comparações de resultados com o programa ATP. Foram também examinados os parâmetros aceitáveis para redução do volume de dados e do tempo de processamento.

Para os casos de faltas analisados, se obtém o melhor valor da constante de amortecimento “a” que propicia a otimização no ajuste das curvas, através da redução do impacto dos erros por amostragem [16][20], no intervalo:

$$0,13 < a < 1,9.$$

Cabem estudos futuros para o tratamento das condições de aplicação da constante de amortecimento.

Nos casos analisados do sistema, não foram observadas grandes variações entre os modelos de linha (Bergeron e J Marti), para o sistema analisado, que não apresenta transitórios de frequências elevadas, no entanto, podem existir situações em que o modelo J Marti seja necessário para aumentar a precisão dos resultados.

Com todo o tratamento feito no domínio da frequência a partir da montagem da matriz de admitâncias nodais, aproximações de modelos podem ser eliminadas e o cálculo da TRT pode ser considerado com mais precisão, sobretudo em casos em que os programas de transitórios apresentem imprecisões numéricas.

REFERÊNCIAS

- [1] Zanetta Junior, L. C.. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. EDUSP, pp 561-609, cap 15, 2020.
- [2] FRONTIN, S . O. **Equipamentos de Alta Tensão - Prosp. e Hierarq. de Inovações Tecn.** , P&D Aneel - Taesa - Brasnorte - Finatec - UnB, 2013.
- [3] Colombo, R. **Disjuntores de Alta Tensão**. São Paulo: Livraria Nobel ,1986.
- [4] GE, **Disjuntores do tipo Tanque Vivo - 72,5-550kV - XD /** disponiv. em https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/XDGE/Portuguese/LTCB72_5_550kVPTA4-web.pdf.
- [5] ABNT NBR IEC 62271-1 : 2007 . **High-voltage switchgear and controlgear — Part 1. Common specifications - 2007**.
- [6] IEEE Std C37.04-2018, **IEEE Standard for Ratings and Requirements for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage Above 1000 V**. IEEE, 2018.
- [7] IEC/TR 62271-306. **High-Voltage Switchgear and Controlgear – Guide to IEC 62271-1/100 and Others**. Geneve, 2012.
- [8] IEC 62271-100 Edição 2.1 (2012-09). Antiga - IEC 56-1987. **High Voltage Alternating Current Circuit Breakers**, Geneve, 2012.
- [9] IEEE Std C37.012-2005(R2011), **IEEE Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers**. IEEE, 2011.
- [10] Preto, P. O. **Cálculo da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2017.

[11] NAEF, O.; ZIMMERMAN, C. P; BEEHLER, J. E. Proposed Transient Recovery Voltages, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 94, n.7, p.580-608, July 1965.

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

[13] Wagner, C. L. ; Smith, H. M. Power Circuit Breaker Transient Recovery Voltages, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. 103, n.11, p.3354-3364, Nov. 1984.

[14] Gómez, P. ; Uribe, F. A. The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices. **International Journal of Electric Power & Energy Systems**, February 2009.

[15] MONTANARI, A. A. **Religamento Monopolar Adaptativo Rápido Baseado na Assinatura Harmônica da Tensão de Arco Secundário**. Dissertação (M.Sc.), UNICAMP, Campinas, SP, 2009.

[16] MORENO, P.; RAMIREZ, A. Implementation of the Numerical Laplace Transform : A Review. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.23, n.4, p.2599-2609, October 2008.

[17] Leuven, K.U, **ATP: Alternative Transients Program**. Rule Book. Leuven EMTP Center, 1987.

[18] Gustavsen, B. Optimal Time Delay Extraction for Transmission Line Modeling," in **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 32, no. 1, p. 45-54, Feb. 2017.

[19] Kocar, I. ; Mahseredjian, J. New Procedure for Computation of Time Delays in Propagation Function Fitting for Transient Modeling of Cables, **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 31, no. 2, pp. 613-621, April 2016.

[20] D. J. WILCOX, Numerical Laplace transformation and inversion, **Int. J. Elect. Eng. Educ.**, vol. 15, pp. 247–265, 1978.

[21] D'Ajuz, A. **Equipamentos Elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão**. FURNAS Centrais Elétricas S.A., Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1985.

[22] Sinder, D. **Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão**. Dissertação (M.Sc.), UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

[23] Siemens, **Disjuntores a Vácuo 3AH**, São Paulo, Maio 2001.

[24] CG POWER, **Catálogo**. Disponível em: <https://www.ska.com.br/ska/cases/cg-power-conta-com-tecnologia-qc-para-desenvolver-projetos-eletricos-de-disjuntores-de-alta>.

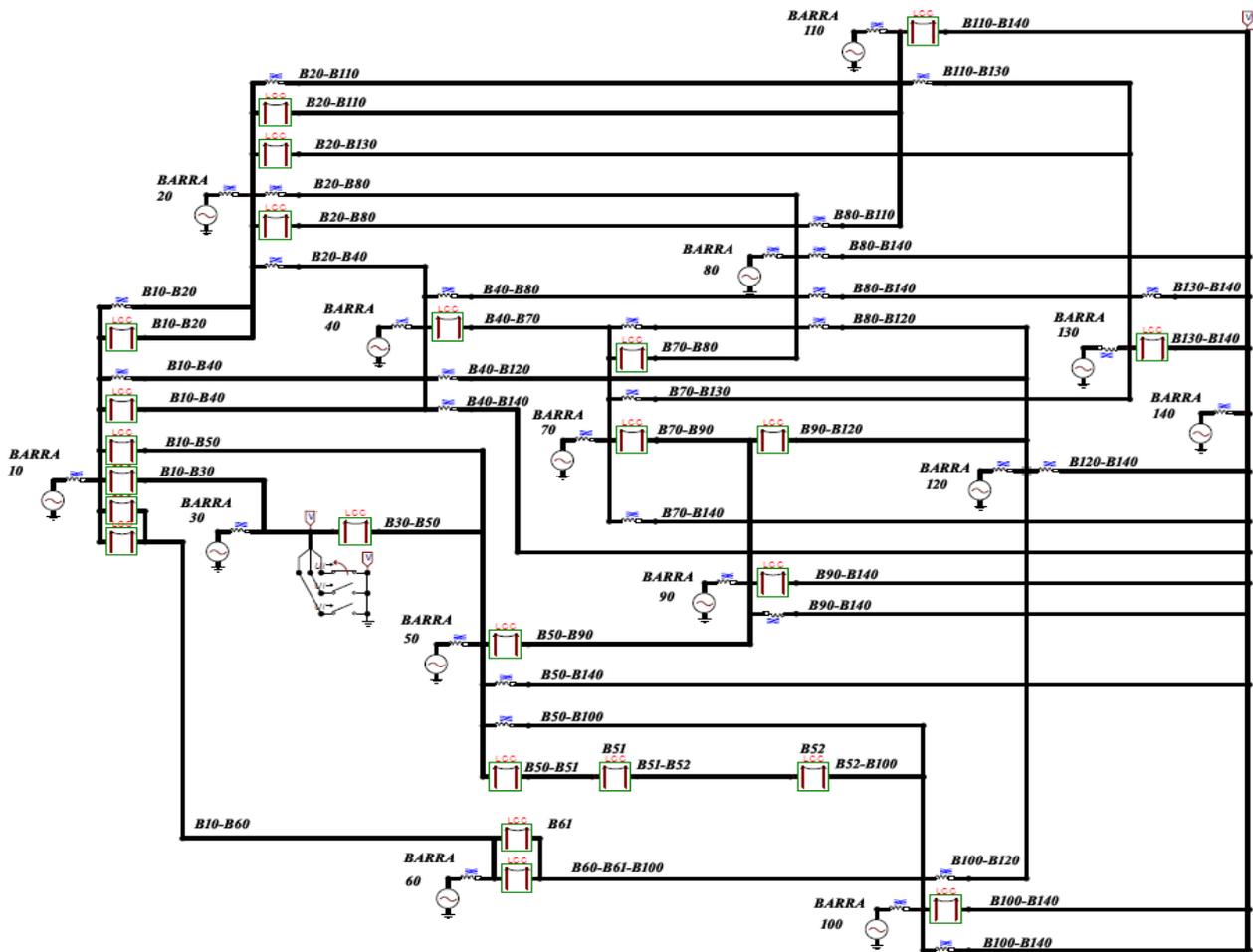
[25] SOUZA, D. P. M. **Localiz de Faltas em Linha de Transm de Energia pela Análise da Função de Autocorrelação**. Dissertação (M.Sc.), UFF, Volta Redonda, RJ, 2018.

[26] VAN ZEE, W.H.; FELTON, R.J. 500 kV System Relaying-Design and Operating Experience. CIGRE - **Conseil International des Réseaux Électriques**, n. 34-07, Paris, 1978.

[27] ESZTERGALYOS, J. **The Application of High Speed Grounding Switches on EHV-UHV Power Systems to Enhance Single Pole Reclosing-Control and Protection**. Western Protective Relay Conference, Washington, USA, 1981.

ANEXO I : REDE MODELO PARA OS CÁLCULOS DA TRT

Figura 26 - Rede Modelo de Análise



ANEXO II - EQUIPAMENTO PARA MANOBRAS DOS CIRCUITOS

1. DISPOSITIVOS PARA OPERAÇÃO SEM CARGA

Algumas funções de manobras nas redes elétricas dos sistemas de potência, são executadas apenas com a finalidade de configurar, energizar e desenergizar os circuitos elétricos; isso significa que não são esperadas circulações de correntes de cargas e/ou de faltas no sistema sendo estabelecidas no fechamento do dispositivo ou interrompidas na abertura do circuito. Para essas funções é usada a Chave Seccionadora cuja aparência, à primeira vista, mostra-se como um barramento móvel, capaz de suportar a tensão elétrica no ponto de instalação, mantendo a isolação e as solicitações dielétricas em todas as suas partes e possíveis posições. Quando os seus contatos estiverem fechados, deverão suportar todas as solicitações de correntes no circuito considerado da rede.

Apresentamos algumas funções para as quais são usadas as chaves seccionadoras conforme apontadas na referência [2] :

- Isolação de equipamentos para manutenção. Ex. : Barramentos, Disjuntores, Transformadores etc.
- Transferência de Barras em subestações com barra dupla. Barra principal e barra secundária, onde são conectadas as fontes e as cargas.
- Bypass de equipamentos. Ex.: Disjuntores, Capacitores Série etc.
- Seccionadores de Aterramentos para atender demandas operacionais entre elas a manutenção nos equipamentos.

2. DISPOSITIVOS PARA OPERAÇÃO A PLENA CARGA

O papel desempenhado pelos disjuntores, cujos tipos e detalhes construtivos estão no ANEXO III, utilizados nos sistemas elétricos de potência, assume grande importância, pois são utilizados principalmente para o estabelecimento e a interrupção das correntes nominais do circuito, correntes de magnetização de transformadores e reatores, correntes capacitivas de bancos de capacitores e de linhas em vazio. A função mais nobre que representa o grande

mérito na operação dos disjuntores é a interrupção de correntes de faltas, como aquelas observadas em curtos-circuitos.

Dessa forma, os disjuntores deverão ser especificados para atender as condições extremas de operações como estão descritas em [21], [2], [5] e [6], incluindo também margens que satisfaçam expansões previstas do sistema, a fim de se evitar as suas superações em curto prazo [22].

Aponta-se também a existência de chaves seccionadoras de operação em carga, muito utilizadas no parque norte-americano, que são dotadas de resistores de pré-inserção e lâminas de contatos de sacrifício (restritor de arco); esse equipamento é utilizado para algumas aplicações que não necessitem da sua operação durante faltas no sistema elétrico. Exemplos de aplicações: chaveamentos de bancos de capacitores, de reatores ou de filtros de harmônicos em subestações conversoras CA-CC. Os fatores que influenciam na decisão da utilização desse equipamento ao invés de disjuntores, passa pelo crivo de considerações técnicas e econômicas [2].

O Item 2.1.3 apresenta um resumo das principais características elétricas exigidas para a completa especificação de um disjuntor.

ANEXO III : COMPOSIÇÃO DE UM DISJUNTOR DE ALTA TENSÃO

Nas subestações de energia elétrica, todas as operações das manobras de carga, bem como as operações automáticas das proteções de todo o sistema tanto da rede interna como das linhas de transmissão, são executadas pelos disjuntores; por esse motivo a atuação precisa dos disjuntores é mandatória,.

Segue uma breve exposição da composição de um disjuntor e de suas características, apontando seus detalhes construtivos nos vários tipos encontrados no mercado. O foco de atenção é dado para os equipamentos que operam em alta tensão elétrica.

Um disjuntor é constituído por elementos mecânicos acionados de diversos modos, entre eles: elétrico, hidráulico, pneumático ou combinações entre eles através de um armazenamento energético que é descarregado nos instantes desejados para o fechamento ou a abertura dos contatos principais, para que eles se façam da forma mais rápida e confiável possíveis.

Os contatos principais são os responsáveis pela manobra das correntes que circulam nos circuitos das redes elétricas do sistema. Os contatos principais estão localizados dentro de uma unidade denominada Câmara de Extinção, cujo princípio de funcionamento já foi explicado no item 2.1.1 da Fundamentação Teórica, e não será tratado neste Anexo III.

Os sistemas que compõem um disjuntor podem ser resumidamente descritos da maneira que segue:

1. SISTEMA DE ACIONAMENTO DE UM DISJUNTOR

O sistema de acionamento tem como função principal a movimentação de abertura e fechamento dos contatos principais de forma confiável e segura, que representa a operação final para a qual o equipamento é concebido. O fator que agrava essa função principal, é o fato que na maioria das aplicações os disjuntores são colocados em operação, permanecendo os seus contatos fechados por longos períodos de tempo.

Assim como todos os outros, esse sistema é fundamental, pois:

- Os instantes de solicitação de abertura dos contatos ocorrem por necessidade de manobra ou pela atuação das proteções que visam eliminar as faltas no sistema elétrico de potência. Como requisito operacional, observam-se respostas mecânicas de abertura dos contatos principais inferiores a 40 ms [21].
- Essas intervenções no circuito principal devem ser realizadas pelo sistema de acionamento com presteza e alta confiabilidade; isso significa uma operação cujo tempo de resposta seja o mínimo possível com a tecnologia mais recente disponível.

O princípio básico de funcionamento de todo o sistema de acionamento entre os diversos tipos existentes é o armazenamento de energia potencial em um meio elástico apropriado; esse armazenamento é realizado por uma fonte auxiliar de energia; o descarregamento acontece durante os instantes de fechamento e de abertura dos contatos principais; logo após essa operação, se processa o rearmazenamento energético no meio elástico do sistema de acionamento do disjuntor, tornando-o apto para novo acionamento.

Quanto ao número de polos a serem acionados, podem-se classificá-los em acionamentos mono ou tripolares.

- Tripolar: existe apenas um sistema de acionamento para os três polos.
- Monopolar: em alguns sistemas de potência há situações de religamentos monopolares, e assim sistemas de acionamento individuais dos polos serão necessários.

A escolha adequada para cada situação passa por um crivo operacional, econômico e de confiabilidade.

Quanto aos tipos de acionamento, classificam-se:

- Por molas:

Os comandos de abertura e fechamento dos contatos principais são executados através da utilização de energia potencial armazenada em molas. Essas molas podem ser carregadas por solenoides, motores elétricos, ou mesmo manualmente. A bobina solenoide é pouco usada para disjuntores de alta tensão pois a sua capacidade é reduzida para operar as molas convenientemente.

Uma notória restrição para o uso desse tipo de acionamento é a simplicidade do mecanismo que não propicia informações supervisórias quanto à sua integridade operacional. Por esse motivo ele é utilizado para sistemas abaixo de 138 kV.

- Por ar comprimido

Neste tipo de acionamento, o ar comprimido é o responsável por armazenar a energia que faz a operação de fechamento e abertura dos contatos principais do disjuntor.

A ordem de operação da mudança de estado, que é um sinal elétrico vindo do sistema de controle, é recebida e conduzida às válvulas solenoides, estas são válvulas pneumáticas operadas por princípio eletromagnético. Assim, o ar comprimido que estava armazenado em cilindros apropriados escapa liberando a energia sobre os êmbolos, transmitindo o movimento para as hastes principais de acionamento dos contatos principais e auxiliares.

O ar no sistema pneumático é devidamente seco e mantido à pressão de operação segura, conforme as normas da boa técnica.

O acionamento por ar comprimido é utilizado para disjuntores de alta e extra-alta tensão.

- Por sistema hidráulico

O armazenamento energético para a movimentação dos contatos neste tipo de acionamento é feito em um cilindro com um êmbolo interno de duplo meio, dividindo a câmara em duas partes. Uma dessas partes está ligada ao circuito hidráulico com óleo mineral isolante e este a outro êmbolo, chamado diferencial, que se conecta à haste e acionamento dos contatos principais.

A outra parte da câmara descrita acima está preenchida com gás nitrogênio (N_2), que devido a característica compressível do meio, armazena a energia para as operações de abertura e fechamento do disjuntor mantendo do outro lado do êmbolo de duplo meio o óleo pressurizado ao nível apropriado e seguro de trabalho.

O disparo da abertura ou fechamento é proporcionado por duas válvulas solenoides que atuam no circuito hidráulico pressurizado, realizando o trabalho que é destinado a cada uma delas.

Devem-se ressaltar as vantagens abaixo:

- Capacidade de armazenar grande quantidade de energia.
- O conjunto apresenta dimensões reduzidas

2. CONCEITOS DE CÂMARAS DE EXTINÇÃO.

A câmara de extinção é a unidade responsável pelo estabelecimento e pela interrupção da corrente principal do circuito que o disjuntor está instalado e em operação.

No item 2.1.1, descreve-se a câmara de extinção com mais detalhes, explicando o princípio da extinção do arco elétrico.

Nos itens que seguem são mencionados os principais conceitos de câmara de extinção em disjuntores de alta tensão:

a) a Sopros Magnético

Os contatos principais, neste tipo de disjuntor, são abertos no ar. O arco elétrico por efeito do campo magnético produzido pela corrente principal a ser interrompida, é empurrado para os contatos auxiliares e destes para as aletas das câmaras de extinção. Estas aletas são fendas onde o arco é forçado a aumentar o seu comprimento, ocasionando também a sua fragmentação; assim uma fração do arco é distribuída para cada fenda, nas quais os pequenos arcos são resfriados e extintos.

Em casos em que o campo magnético é insuficiente para impelir o arco em direção à fenda, devido a um pequeno valor da corrente principal, utiliza-se adicionalmente um dispositivo com sopro pneumático.

As paredes que formam as cavidades nas câmaras de extinções são construídas por vários materiais metálicos ou isolantes bem como a combinação entre eles, dependendo da construção do fabricante.

b) a Ar Comprimido.

Este tipo de disjuntor, também chamado de eletropneumático, necessita de ar comprimido em quantidade de volume e pressão suficientes para propiciar a operação de fechamento e abertura dos contatos principais, e também

para a extinção do arco elétrico, pois ela é obtida pelo disparo de um jato de ar sobre os contatos.

Essa quantidade de ar utilizado é armazenada em cilindros que normalmente são esvaziados após cada operação de abertura dos contatos principais.

A direção do sopro de ar via de regra, se dá na direção axial aos bocais e contatos.

Os bocais por onde circula o escape de ar rumo ao espaço exterior à câmara pode ser do tipo unidirecional, quando o sentido desse escape é oposto ao movimento do contato, ou bidirecional quando esse escape se dá em ambos os sentidos instantaneamente.

Entre as vantagens do uso desse tipo de equipamento, salientam-se:

- Disponibilidade total do meio extintor que também é o meio de acionamento.
- Os mecanismos de acionamento são relativamente leves o que leva o equipamento atuar com uma resposta muito rápida. Por isso são utilizados para disjuntores de alta e extra-alta tensões.
- Uma forma de ajustar a capacidade de interrupção e de isolação é através da variação da pressão do ar comprimido. Obviamente esse ajuste é pequeno, dentro das limitações impostas pelas distâncias mínimas para a construção do equipamento no meio considerado.
- Pelo fato da propriedade de compressibilidade do ar em oposição ao equipamento hidráulico, as estruturas de apoio mecânico não ficam sujeitas às ondas de choque geradas pelo arco.

Como desvantagens citam-se:

- Alto custo na geração do ar comprimido.

- A pressão operacional do ar deverá ser monitorada constantemente para permitir atuações com respostas confiáveis do equipamento.
- A manutenção é intensa em todo o sistema pneumático.
- A operação é muito ruidosa, exigindo em alguns casos a utilização de silenciadores.

c) a Óleo Mineral Isolante.

Essa construção representa uma das primeiras técnicas utilizadas para a extinção de grandes correntes elétricas.

O arco elétrico desenvolvendo-se dentro do meio líquido e isolante, propicia o seu resfriamento de uma forma mais efetiva pois o calor será removido principalmente por dois fatores operantes:

- O aumento da pressão ao redor do arco elétrico, desenvolve um fluxo de óleo mais frio, alongando-o e por fim extinguindo-o.
- A decomposição das moléculas do óleo devido à alta concentração energética do arco elétrico liberando hidrogênio, funciona como meio refrigerante pois a condutividade térmica do H_2 é bem elevada e contribui para o esfriamento do arco.

Quanto ao volume de óleo, os disjuntores podem ser caracterizados em duas categorias:

A. Disjuntor a grande volume de óleo.

Inicialmente estes disjuntores foram construídos com seus contatos principais fixos e móveis mergulhados em um simples tanque, sem câmara de extinção; as câmaras de extinção foram introduzidas nos tanques após pesquisas de desenvolvimento posteriores. Veja Figura 25.

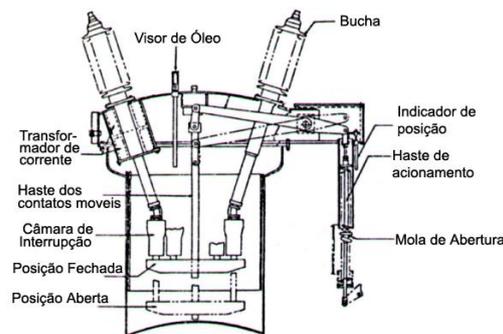
Nas aplicações para as altas tensões, vale salientar que as fases ou os polos são imersos em tanques separados.

Em geral o tanque que abriga todo o equipamento é rigidamente aterrado, o que o identifica por disjuntor do tipo “dead tank”.

Devido às suas grandes dimensões, o disjuntor a grande volume de óleo, pode conter transformador de corrente na parte interna do tanque.

Apesar de sua grande capacidade de interrupção, abrindo circuitos energizados sob grandes correntes de curto-circuito, esse tipo de construção que é regularmente encontrado nos sistemas elétricos de potência, na atualidade não é mais especificado nos novos projetos.

Figura 27 - Disjuntor a Grande Volume de Óleo.



Detalhes construtivos.



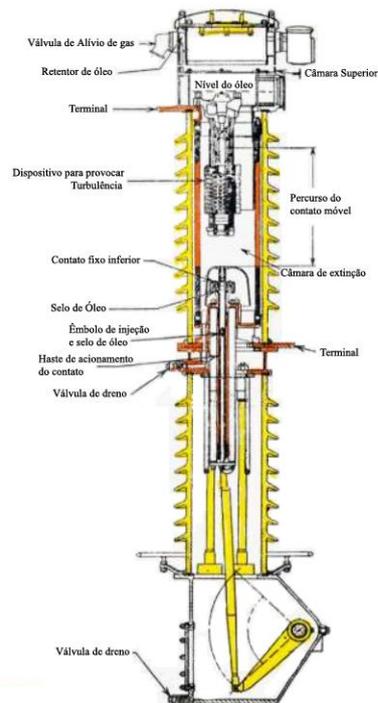
Foto de instalação.

Fonte : Catálogo de Disjuntores Westinghouse

B. Disjuntor a pequeno volume de óleo.

Esse tipo de equipamento é o resultado da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico, anterior a 1930, a partir da construção do disjuntor a grande volume de óleo descrito acima. Originalmente, já foi concebido equipado com as câmaras de extinção individuais para cada fase ou polo, dependendo do tipo de sistema elétrico utilizado. Estas câmaras de extinção poderão ser do tipo sopro transversal ou sopro axial (longitudinal). Foto do equipamento bem como o desenho de suas partes interiores podem ser vistos na Figura 26.

Figura 28 - Disjuntor a Pequeno Volume de Óleo



Fonte : SANTOS, E. GIL. Comiss.Manut.Disj.AT/MT

A construção desse disjuntor permite uma redução significativa nas suas dimensões físicas, nas estruturas de apoio bem como na quantidade de óleo mineral a ser utilizado.

A vantagem principal para o uso desse equipamento, reside no seu desempenho por causa do melhoramento de suas características elétricas.

d) a Hexafluoreto de Enxofre, SF₆.

Para a isolação das partes vivas e também para a extinção do arco elétrico, o gás SF₆ é utilizado neste tipo de disjuntor e se constitui numa das melhores soluções para os mais altos níveis de isolação e capacidade de interrupção de altas correntes.

Mais detalhes desse tipo de disjuntor podem ser encontrados no item 2.1.2 deste trabalho.

e) a Vácuo.

O mecanismo de condução que produz as correntes elétricas no vácuo através dos arcos é bem diferente do que acontece em outros meios utilizados. No vácuo, a corrente elétrica é sustentada pelos íons metálicos liberados pela evaporação dos contatos principais do equipamento. A corrente elétrica a ser interrompida pelo disjuntor é a fonte que proporciona a formação dessa nuvem de íons, cuja intensidade é proporcional àquela corrente.

Este tipo de disjuntor vem sendo estudado e os primeiros ensaios conhecidos são desde os anos de 1926, porém somente utilizado em escala industrial na década de 1960; isso aconteceu por causa do grande desenvolvimento de novos materiais no período.

Na Figura 27, observa-se um corte de uma câmara de extinção a vácuo.

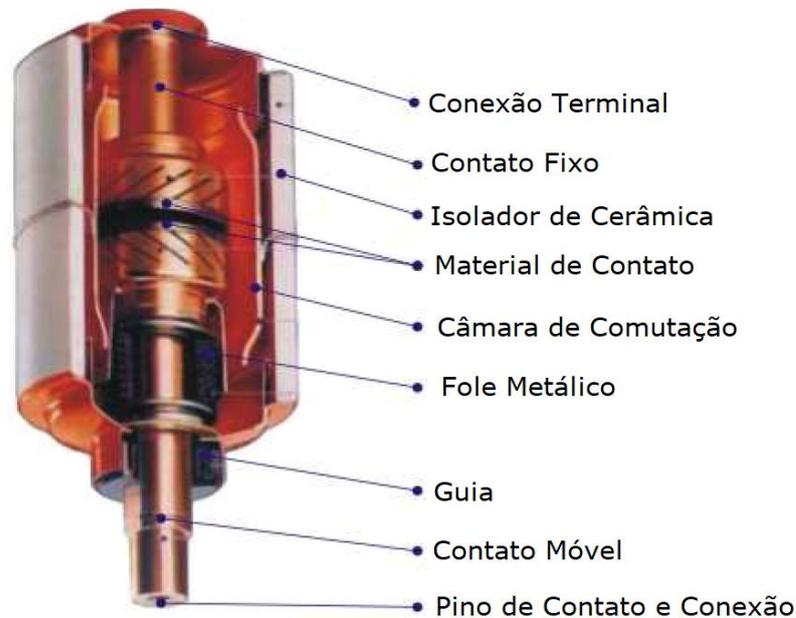
Da mesma forma como explicado nos outros meios extintores, o arco elétrico somente será extinto quando a corrente elétrica no vácuo passar pelo valor nulo.

Com a extinção do arco, cessa a produção da nuvem iônica e as partículas de vapor metálico em suspensão, retornam à superfície dos contatos, fazendo com que a rigidez dielétrica do meio aumente rapidamente e assim a capacidade de isolamento na câmara de extinção é recuperada completamente.

Dentre as diversas vantagens na utilização de disjuntores com câmaras de extinção a vácuo, constata-se:

- a rápida recuperação da rigidez dielétrica do meio propicia a utilização do equipamento para rápidos religamentos do sistema.
- a vantagem descrita acima leva a sua utilização para sistemas de distribuição em média tensão, até 38 kV.
- alta confiabilidade com grande segurança operacional, uma vez que o meio extintor é do tipo não inflamável.
- pouca manutenção nos contatos; vida útil bem alta.
- permite a construção de câmaras de extinção dimensionalmente pequenas.

Figura 29 - Câmara de Extinção a Vácuo



Fonte: Disjuntor Siemens [23]

3. CENTRAL DE COMANDO DE UM DISJUNTOR

O mecanismo que opera o sistema de acionamento dos disjuntores pode ser controlado de uma forma automática ou manual e também local ou remotamente. Todo o equipamento auxiliar que contribui na operação, monitoração e proteção do disjuntor é reunido em um gabinete metálico e em geral é instalado na mesma estrutura de apoio do equipamento ou nas imediações da área de instalação. O potencial elétrico desse gabinete é mantido rigidamente aterrado.

Entre os diversos equipamentos auxiliares que fazem parte da central de comando de um disjuntor, destacam-se: controladores lógicos programáveis (CLP), botoeiras, chaves comutadoras, relés, chaves contadoras, solenoides, relés

com diversas funções de tempo e de estados físicos do sistema elétrico, hidráulico e pneumático e seus correspondentes medidores ou registradores. Os CLPs são os dispositivos eletrônicos responsáveis por toda a lógica necessária à operação adequada dos disjuntores; eles embarcam a codificação dos algoritmos operacionais locais.

Uma função que é considerada de extrema importância na unidade de comando de um disjuntor é a designada por antibombeamento. O bombeamento neste contexto é caracterizado por uma série ininterrupta de operações de fechamento e abertura do disjuntor, causadas por faltas nos componentes do controle, situação altamente insegura e prejudicial ao sistema; em outras palavras, além dos intertravamentos necessários para a correta operação dos componentes, cria-se outra função apenas para servir como supervisão impeditiva de operação irregular por faltas em componentes. Figura 28 ilustra esse equipamento pela foto do gabinete aberto.

Figura 30 - Foto Exemplo de Unidade de controle de Disjuntores



Fonte: CG Power [24]

ANEXO IV : SINOPSE DAS PRINCIPAIS FALTAS ELÉTRICAS

Neste trabalho, apontam-se os defeitos mais frequentes nas redes de energia elétrica.

Os sistemas elétricos de potência, apesar de serem projetados para a máxima disponibilidade e confiabilidade possíveis, são passíveis de faltas, que representam interrupções no fornecimento da energia elétrica.

As interrupções de energia podem ser classificadas como programadas, permanentes e temporárias. Destas, as duas últimas são interrupções indesejadas, pois surpreendem e prejudicam concessionárias, autoridades e usuários.

As interrupções programadas advêm das necessidades operacionais de manobras de cargas, realizações de manutenções preventivas ou corretivas, bem como para a execução de atualizações, melhoramentos ou expansões do sistema.

As interrupções denominadas permanentes ocorrem por faltas elétricas no sistema e causam a suspensão no fornecimento de energia pois impedem o religamento subsequente. Elas indicam a necessidade de reparos e manobras imediatas, e às vezes até a aplicação de algumas medidas emergenciais ao sistema. Com a utilização da boa técnica e a correta especificação dos equipamentos, estas interrupções podem e devem ser minimizadas, pois oneram grandemente as operações dos sistemas elétricos de potência.

As interrupções temporárias também ocorrem por faltas elétricas no sistema, porém elas permitem o religamento do fornecimento de energia imediatamente após a sua constatação ou executam o religamento automático operado por algum dispositivo de proteção de retaguarda; estas acontecem quando ocorrências adversas previstas ou não, incidem e rapidamente desaparecem do sistema elétrico. [25].

Diversas são as causas das faltas nos sistemas elétricos e pode-se afirmar que, a maioria delas concentra-se nas linhas de transmissão, pois percorrem grandes distâncias, tendo suas fases expostas a possíveis contatos entre elas e a terra (torre), bem como a agentes externos ao sistema (descargas atmosféricas, queimadas, vandalismos etc). Na tabela VI abaixo, observa-se o número de ocorrências de faltas em um sistema de energia elétrica de porte médio; considerando-se todas as faltas nesse sistema, 87% delas ocorrem nas linhas de transmissão.

Tabela VI- Faltas em um sistema de 500 kV

<u>Equipamento do Sistema</u>	<u>Número de Faltas</u>
Linhas de Transmissão	82
Transformadores	6
Circuitos Disjuntores	4
Barramentos	1
Geradores	1

Período de observação: 10 anos

Fontes: MONTANARI, ALLAN A. [15] e VAN, ZEE [26]

Dentre os diversos tipos de faltas, os mais comuns são os curtos-circuitos que produzem sobrecorrentes e assimetrias nas tensões elétricas.

As principais faltas que serão tratadas neste trabalho, como mencionado no item 3.2, são aquelas provenientes de curtos-circuitos que ocorrem nas redes de energia elétrica compostas por sistemas de geração, subestações e linhas de transmissão.

Nos sistemas trifásicos convencionais, cinco são as possibilidades de curto-circuito:

- a. Uma das fases é conectada ao terra do sistema. Este é denominado “curto-circuito monofásico”.
- b. Duas das fases são conectadas entre si. Este é denominado “curto-circuito bifásico”.
- c. Duas das fases são conectadas entre si e também ao terra do sistema. Este é denominado “curto-circuito bifásico com terra”.
- d. As três fases são conectadas entre si. Este é denominado “curto-circuito trifásico”.
- e. As três fases são conectadas entre si e também ao terra do sistema. Este é denominado “curto-circuito trifásico com terra”.

Nas linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, dados estatísticos demonstram na tabela VII abaixo, a distribuição das faltas elétricas conforme os seus tipos e ocasionadas por curtos-circuitos em linhas de alta e extra-alta tensão:

Tabela VII - Falhas em Linhas de Transmissão Aéreas

Tipos de Faltas	Ocorrências de Faltas em Linhas de Alta Tensão	Ocorrências de Faltas em Linhas de Extra-Alta Tensão
Monofásicas	70 %	93 %
Bifásicas Isoladas	15 %	4 %
Bifásicas com Terra	10 %	2 %
Trifásicas	5 %	1 %

Curtos-Circuitos em Linhas de Alta e Extra-Alta Tensão

Fontes : MONTANARI, ALLAN A. [15] e ESZTERGALYOS, J. [27]

Observando-se a tabela VII acima, pode-se concluir que a grande maioria dos distúrbios apontados são faltas monofásicas e isso fica ainda mais ressaltado quando se trata de linha de extra-alta tensão. Com a elevação da tensão, o distanciamento entre fases também é acrescido, implicando assim na redução das taxas de faltas que comprometem mais de uma fase.

Pelas experiências relatadas em muitas publicações na área de proteção dos sistemas elétricos de potência [15], aponta-se além da predominância das faltas monofásicas nas linhas de transmissão, também estas sendo classificadas como temporárias, isto é, são as faltas que permitem o religamento imediato do sistema de energia, voltando ao seu pleno fornecimento.

De uma forma clara salienta-se que a conclusão obtida acima só é possível se o equipamento foi especificado e comissionado adequadamente. Para isso os estudos de casos deverão ser utilizados à exaustão na elaboração do projeto do sistema.

ANEXO V: INJEÇÃO DE CORRENTES E PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO.

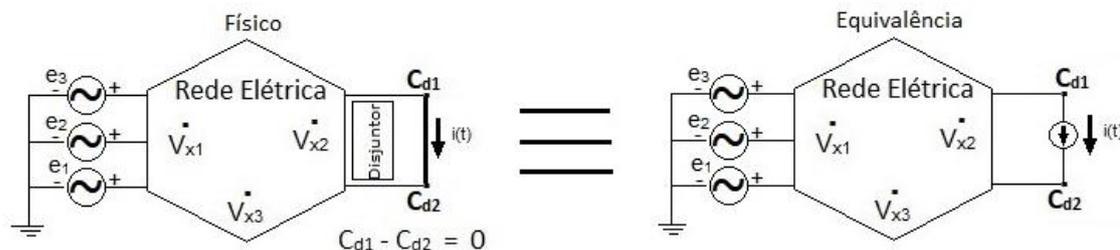
O método de Injeção de Correntes e do Princípio da Superposição é tratado de forma exaustiva na referência [1].

Para a formulação no domínio da frequência, a existência de um disjuntor no circuito é uma dificuldade que deverá ser resolvida com a sua eliminação; assim busca-se um circuito equivalente que, colocado no lugar do disjuntor, desempenhe a mesma função elétrica deste na rede.

Na Figura 29 abaixo, apresenta-se um exemplo de rede, simbolizada pela figura de um hexágono que está conectada a uma fonte de energia elétrica constituída por um gerador trifásico de tensão alternada com valores e_1 , e_2 e e_3 , e também está conectada a um disjuntor monofásico cujos contatos principais se encontram ligados a dois nós, C_{d1} e C_{d2} dessa rede. Considerando-se que esse disjuntor esteja fechado, existe uma corrente $i(t)$ percorrendo seus contatos principais e conseqüentemente a diferença de potencial entre eles será nula.

Utilizando-se do método de injeção de correntes, os contatos fechados do disjuntor podem ser substituídos por uma fonte de corrente cuja magnitude e sentido são equivalentes à corrente que passa nos contatos do disjuntor e assim chega-se à equivalência apontada na Figura 29.

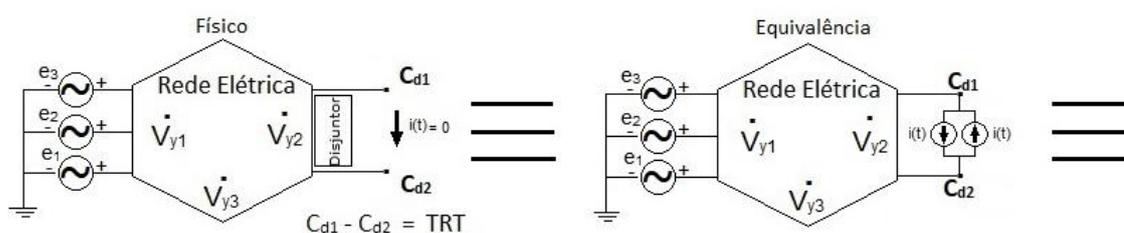
Figura 31 - Circuito Equivalente para Disjuntor com contatos Fechados



Fonte: Autor, [1] e [10]

Pelo mesmo método, os contatos recém abertos do disjuntor podem ser substituídos por duas fontes de corrente cujas magnitudes são equivalentes à corrente que passava nos contatos desse disjuntor quando em estado fechado, porém com correntes em sentidos opostos, chegando à equivalência apontada na Figura 30.

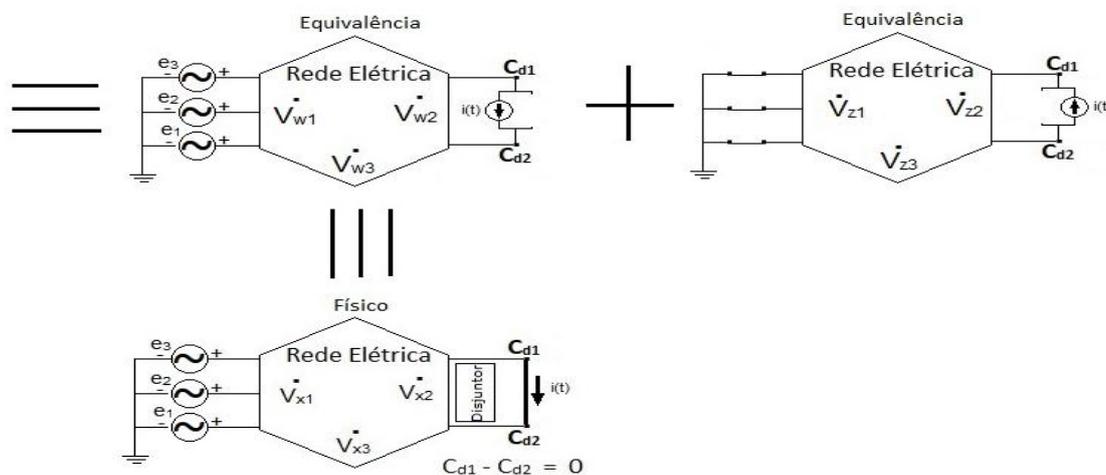
Figura 32 - Circuito Equivalente para Disjuntor com contatos recém abertos



Fonte: Autor, [1] e [10]

Utilizando o princípio da superposição, é possível separar as fontes de corrente do circuito equivalente da Figura 30, lembrando-se que nessa separação anulam-se convenientemente as fontes em uma das partes, porém estarão presentes na outra parte e assim chegam-se às equivalências da Figura 31.

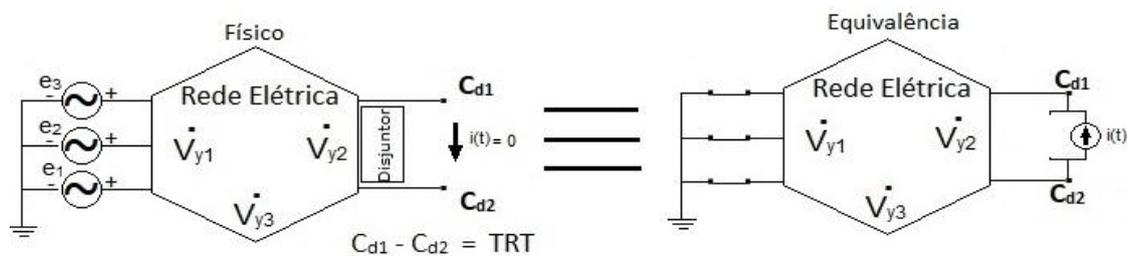
Figura 33 - Separando as fontes de Corrente pelo princípio da superposição



Fonte: Autor, [1] e [10]

Observa-se na Figura 31 que o circuito equivalente da primeira parte é equivalente a um circuito físico com o disjuntor tendo os contatos fechados; logo a diferença de potencial entre os contatos será nula, o que mostra a não contribuição desta primeira parte no cálculo da TRT, podendo ser removida da equivalência e chegando-se à equivalência final apresentada na Figura 32.

Figura 34 - Circuito Equivalente Final do Disjuntor com contatos recém abertos



Fonte: Autor, [1] e [10]

Com esse recurso, consegue-se a eliminação da chave que se mostrava inconveniente para a formulação no domínio da frequência.

Em resumo, para o cálculo da TRT é suficiente anular todas as fontes existentes na rede e inserir no lugar dos contatos do disjuntor, uma fonte de corrente com o valor da corrente de curto-circuito considerado, porém no sentido contrário do circuito físico original.