

**ESPECIFICAÇÃO DE
DISJUNTORES
CONSIDERANDO A TENSÃO
DE RESTABELECIMENTO
TRANSITÓRIA (TRT)
UTILIZANDO A
PLATAFORMA ATPDRAW**

**CIRCUIT BREAKER SPECIFICATION CONSIDERING TRANSIENT RECOVERY
VOLTAGE (TRV) USING THE ATPDRAW PLATFORM**

Engenharias • 16/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/792113063](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/792113063)

Natasha Candido Vilela¹

Aurea Messias de Jesus²

Alexandre Bonifácio Campos³

Olavo Antônio de Oliveira Reis⁴

Agaone Donizete Silva⁵

Gabriela Costa de Oliveira⁶

RESUMO

O setor elétrico brasileiro está sujeito a interferências e perturbações que podem ser causadas por curtos-circuitos ou descargas atmosféricas. O conhecimento deste fato e o correto dimensionamento de dispositivos de manobra e proteção são de extrema necessidade e importância. A partir de cálculos de parâmetros de linha, da utilização de dados técnicos e com o auxílio de um software, foi possível realizar a simulação de um circuito industrial, no qual foi inserido um curto-circuito, permitindo o conhecimento da corrente curto-circuito. Com isso, e por meio de tabelas acordadas com a NBR 7118, tornou-se visível a Tensão de Restabelecimento Transitória, o que permite o correto dimensionamento de um disjuntor que suporte determinado evento.

Palavras-chave: Corrente; Curto-circuito; Disjuntor; Tensão; TRT.

ABSTRACT

The Brazilian electric power sector is susceptible to disturbances caused by events such as short circuits or lightning strikes. Understanding this fact and correctly sizing switching and protection devices are of critical importance. By calculating line parameters, utilizing technical data, and employing simulation software, it was possible to model an industrial circuit and simulate a short-circuit event to determine the resulting short-circuit current. This analysis, combined with data tables compliant with the NBR 7118 standard, allowed for the determination of the Transient Recovery Voltage, thereby enabling the correct selection of a circuit breaker capable of withstanding the specific event.

Keywords: Circuit-Breaker; Current; Short-circuit; TRT; Voltage.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de conhecer sobre um assunto extremamente necessário, pouco falado, mas que está a caminho de ser mais disseminado no âmbito acadêmico e também popular. Com os avanços tecnológicos e com os aprimoramentos dos mecanismos utilizados para operação e manobra do sistema interligado nacional (SIN), faz-se necessário compreender a dinâmica de funcionamento das redes elétricas diante de tantas intempéries passíveis de ocorrer a cada instante, especialmente no que diz respeito à ocorrência de curtos-circuitos.

Devido à alta dinamicidade envolvida no processo de operação de redes elétricas de transmissão e distribuição, as quais são submetidas a conexões de diferentes tipos de carga, conhecer os níveis de curto-circuitos destes sistemas é fundamental para a realização de um dimensionamento adequado dos seus sistemas de proteção. Dessa forma, torna-se possível o sistema operar em segurança para todos os usuários ou equipamentos dependentes dele.

Abordando então especificamente redes de transmissão de alta tensão, a realização de estudos de fluxo de potência, estabilidade e transitórios são importantes para dimensionamento adequado da proteção. Dentre todos os dispositivos de proteção cuja função seja preservar a continuidade do fornecimento de energia elétrica, o dimensionamento de disjuntores de alta tensão merece atenção especial devido à característica indutiva do sistema.

Por possuir característica eletromecânica, a passagem de sobrecorrentes pelos contatos do disjuntor origina um arco elétrico, que ao ser extinto pelo meio isolante, tende a reacender e provocar uma tensão oscilante de alta frequência denominada como Tensão

de Restabelecimento Transitório (TRT). O período transitório é usualmente curto. A fração do seu tempo de operação que a maioria dos circuitos passa pelo período transitório é insignificante comparado com o tempo que ele passa em regime permanente (Greenwood, 1991).

Dessa forma, o engenheiro, ao dimensionar disjuntores de alta tensão para proteção de linhas de transmissão, deve atentar-se à existência do fenômeno físico da TRT. A sua desconsideração pode provocar eventos danosos não somente aos próprios dispositivos, mas também às estruturas da rede elétrica, como as torres de transmissão e o cabeamento ao redor. Se o meio não se recuperar mais rapidamente que a TRT, o arco é restabelecido, outro meio ciclo de corrente ocorre, e o processo de interrupção é mais uma vez tentado até que a interrupção ocorra ou haja a falha do disjuntor (Melo, 2010).

À luz dos fundamentos da existência de TRT's em manobras realizadas em disjuntores de alta tensão, com todo o conhecimento adquirido através das bibliografias citadas neste trabalho e com o auxílio do software de simulação no domínio do tempo ATPDraw, será possível realizar o dimensionamento de disjuntores de alta tensão considerando o fenômeno supracitado. O ajuste correto destes dispositivos considerando a TRT será mostrado por meio da representação de um circuito equivalente de um sistema de transmissão de alta tensão no ATPDraw.

Os disjuntores serão dimensionados conforme a NBR 7118 e serão considerados os parâmetros de tensão e corrente da rede do sistema escolhido para que seja possível o correto dimensionamento dos mesmos. Com o auxílio da norma é possível determinar a

envoltória de dois parâmetros, da qual se faz necessário conhecer, para que o correto dimensionamento dos disjuntores se torne possível ao identificar a Tensão de Restabelecimento Transitória.

Serão considerados os parâmetros da linha de transmissão, dos cabos, as capacitâncias das buchas dos disjuntores, do transformador (sendo que este será considerado linear, ou seja, sem saturação), assim como as capacitâncias dos cabos. Sempre em acordo com as normas e o nível de tensão. Alguns cálculos serão necessários para que a modelagem correta do sistema seja efetuada. Por isso, será preciso determinar os dados adquiridos dos cálculos posteriormente efetuados do transformador, da linha de transmissão e dos cabos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Disjuntores de Alta Tensão

Em Júnior (2021) é descrito em detalhes o funcionamento e utilidade dos disjuntores, os quais são classificados como dispositivos de manobra e proteção. Eles atuam abrindo os circuitos elétricos onde estão conectados para evitar que sobrecorrentes, provenientes de alterações de carga ou curto-circuito, possam danificar todo ou parte do sistema de sua cobertura. Dentre as diversas variações de funcionalidades dos disjuntores, destacam-se aqueles denominados disjuntores de alta tensão direcionados a proteger ramos de linhas de transmissão extinguindo arcos voltaicos durante a abertura de circuitos.

O comando para manobra dos disjuntores de alta tensão pode ser realizado manualmente, através da abertura ou fechamento de seus contatos por um operador no local físico de sua instalação, ou

automaticamente, através de comandos enviados por outros dispositivos de proteção, como relés por exemplo. Estes dispositivos geralmente constituem sistemas integrados de proteção direcionados a atender especificamente esse tipo de solicitação.

A designação do tipo dos disjuntores está geralmente associada ao método de extinção do arco elétrico que inevitavelmente, devido à característica indutiva do sistema, é criado em seus contatos. Desse modo, conforme é descrito em Júnior (2021) é comum encontrar disjuntores a óleo, ar comprimido, sopro magnético, a vácuo e a SF6. A Figura 1 é um exemplo deste dispositivo com o meio extintor a vácuo.

Figura 1. Disjuntor de alta tensão isolado a vácuo.



Fonte: China

Disjuntor De Vácuo

Para Alta Tensão

Externa, s.d..

2.1.1. Funcionamento de Disjuntor de Alta Tensão

Na detecção de falta e para a extinção do arco elétrico formado, os disjuntores de alta tensão à sopro magnético funcionam tendo o arco atraído para a câmara de extinção pelo campo magnético gerado pelas bobinas. Com o aumento da resistência, originado pelas fendas, a interrupção se ocorre.

Tratando-se de disjuntores à óleo, o líquido em específico tem a capacidade de ir resfriando as paredes do dispositivo ao liberar gases, dessa forma rompendo o arco.

Já os disjuntores à vácuo, possuem metal em seus contatos que evaporam. O arco em contato com essa evaporação se extingue.

Os disjuntores à ar comprimido operam prolongando o arco ao injetar o ar, fazendo assim, o seu alongamento acaba se resfriando e então interrompe o mesmo.

Com os disjuntores à SF₆, o gás fica situado numa câmara de baixa pressão. Ao ter seus contatos abertos esse gás é liberado e comprimido por um mecanismo e nesse trajeto um fluxo de gás é criado, ocasionando na eliminação do arco.

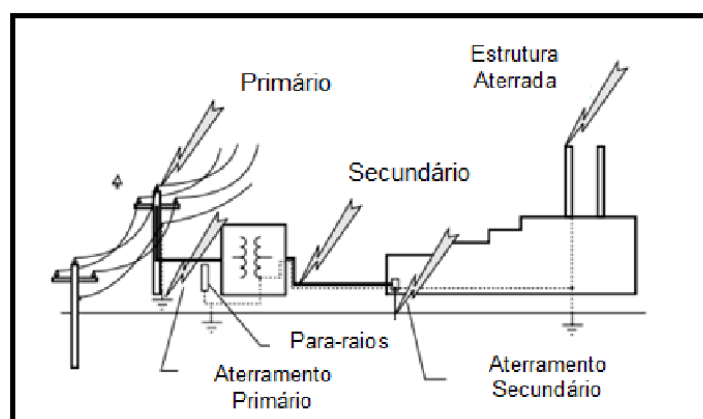
2.2. Transitórios

Transitórios são mudanças repentinas ocorridas em um sistema elétrico. Podem ser ocasionados por chaveamentos no sistema ou mesmo por uma falta detectada nele. O seu tempo de duração é mínimo comparado ao tempo de duração de um sistema em regime permanente, mas os equipamentos contidos nele deverão ser capazes de suportar esse quase insignificante período de tempo, que pode provocar consequências dependendo da proporção do sistema no qual foi originado. Por exemplo, se um transitório for detectado em um sistema de grande potência um efeito poderá ser a falta de abastecimento do sistema elétrico de certa região. Caso seja de uma proporção menor, em apenas um pequeno circuito, poderá ser o desligamento daquele sistema referente a determinado local.

2.2.1. Transitórios Impulsivos

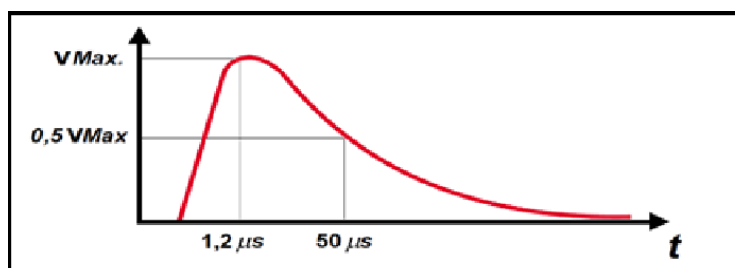
Comumente causados por descargas atmosféricas, como demonstrado na Figura 2, o distúrbio inicia-se quando o sistema em regime permanente sofre uma súbita alteração. Normalmente o mesmo é de alta frequência, que se difere da rede elétrica, possui o seu tempo de aumento e decaimento bem definidos conforme as recomendações internacionais IEEE C6241, IEEE C6234, IEEE C6245, IEC 61643-1 e IEC 61000-4-5. Assim, usualmente adota-se a característica de tempo de $1,2 \times 50 \mu s$ para impulsos de tensão considerando sua polarização unidirecional, como observado na Figura 3.

Figura 2. Aplicação de uma descarga atmosférica em um determinado sistema elétrico.



Fonte: Modificado de Dugan *et al.*, 2004.

Figura 3. Polarização unidirecional positiva proveniente de uma descarga atmosférica.



Fonte: Costa *et al.*, 2014.

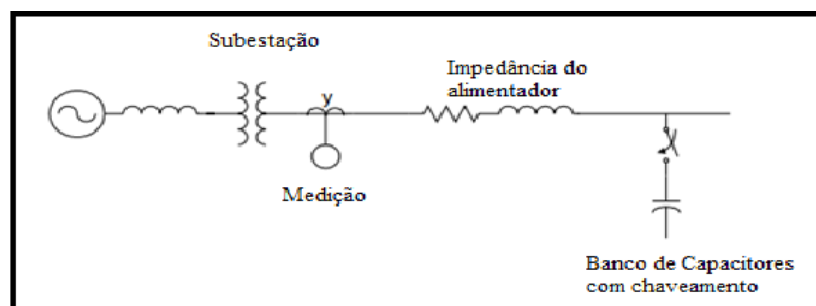
2.2.2. Transitório Oscilatório

Assim como os transitórios impulsivos, os oscilatórios são uma súbita alteração no sistema que se encontrava em regime permanente, mas com uma diferença, os oscilatórios são polarizados positivamente e negativamente, podendo ser de baixa, média ou alta frequência.

2.2.2.1. Transitório Oscilatório de Baixa Frequência

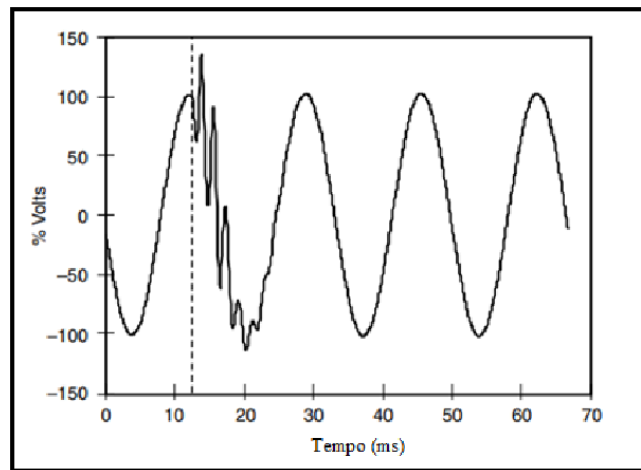
Um transitório com uma componente de frequência primária menor do que 5 KHz, e uma duração de 0,3ms a 50ms, é considerado um transitório oscilatório de baixa frequência (Paulillo; Duarte Teixeira; Bacca, [s.d.]). Comumente encontrados em sistemas de subtransmissão das concessionárias de energia, a energização dos bancos de capacitores pode ocasionar sobretensões e sobrecorrentes capazes de sensibilizar a proteção do sistema. Um esquema típico de conexão de bancos de capacitores é mostrado na Figura 4. Na Figura 5 há um exemplo de forma de onda de tensão transitória provocada pelo chaveamento desse banco.

Figura 4. Banco de Capacitores energizados.



Fonte: Modificado de Dugan *et al.*, 2004.

Figura 5. Transitório típico de 134% da tensão nominal causado pelo chaveamento de banco de capacitores.



Fonte: Modificado de Dugan *et al.*, 2004.

2.2.2.2. Transitório Oscilatório de Média Frequência

Um transitório oscilatório com uma frequência entre 5KHz e 500KHz, podem ser causados por energização de banco de capacitores, eliminação de faltas no chaveamento de disjuntores ou ainda a resposta do sistema em relação a um transitório impulsivo.

No caso dos curtos-circuitos, eles podem ocorrer devido a falhas nos isolamentos dos equipamentos devido às sobretensões causadas por descargas atmosféricas, manobras nas redes, chaveamentos, poluição ou outros fatores mecânicos, como arborizações próximas as redes ou contatos diretos de animais ou estruturas em múltiplas fases do sistema. Logo após a incidência de um curto-circuito, uma corrente de grande intensidade surge nos terminais da máquina síncrona e tem valor proporcional à tensão interna do gerador imediatamente antes da falta e a impedância total localizada entre o ponto da falta e essa máquina síncrona. A corrente CA em uma máquina síncrona. Existem algumas limitações físicas para interrupção da corrente de falta e recuperação da potência. São necessários alguns requisitos mínimos nas cargas que se espera para que suportem a eventos sem distorções (J Duncan Glover; Overbye; Sarma, 2017).

Em relação à intensidade das correntes de curtos-circuitos, elas podem apresentar várias ordens de grandezas que são superiores a corrente nominal do sistema pelo qual elas percorrem até o ponto de falta. Além de provocarem danos térmicos em equipamentos conectados à rede no instante do curto, essas correntes podem ocasionar danos mecânicos a dispositivos de proteção e estruturas devido as suas altas forças magnéticas. Desse modo, é imperativo remover as seções defeituosas dos sistemas o mais brevemente possível, ação essa realizada pelos dispositivos de proteção, como os disjuntores de alta tensão.

2.2.2.3. Transitório Oscilatório de Alta Frequência

Componente de frequência maior que 500KHz, os transitórios oscilatórios de alta frequência são geralmente causados por descargas atmosféricas, uma resposta do sistema a um transitório impulsivo ou ainda um chaveamento de um circuito indutivo.

2.3. Arco Elétrico

O arco elétrico é definido com uma ruptura dielétrica na qual produz uma descarga elétrica e, por conseguinte uma corrente em um meio físico não condutor. Essa descarga elétrica ocorre geralmente quando a corrente que passa pelo meio é interrompida de forma abrupta, seja por execução de manobras na rede ou também por atuação de dispositivos de proteção. Ele também pode ocorrer quando a distância de segurança entre dois condutores de potenciais diferentes é pequena, considerando também casos em que há uma pequena distância entre partes metálicas sem tensão e condutores energizados. Em certos disjuntores, os contatos principais servem também como contatos de arco, mas, em outros,

os contatos de arco são distintos (Abnt Nbr 7118, 1994). A Figura 6 ilustra o fenômeno.

Figura 6. Exemplo de Arco Elétrico.



Fonte: Pinto, 2022.

2.4. Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)

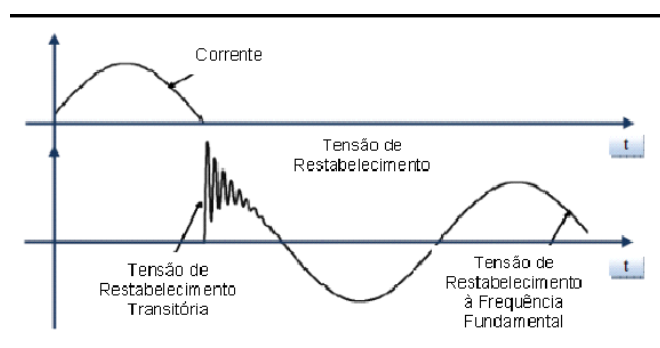
Ao identificar uma corrente típica de fenômenos de descarga atmosférica ou curtos-circuitos nas redes, os relés de sobrecorrente irão atuar sobre os disjuntores, enviando um comando para abertura da menor região afetada possível. Após ter ocorrido a separação mecânica dos contatos do disjuntor para interromper a sobrecorrente provocada pelo transitório, inevitavelmente é formado um arco elétrico entre os seus contatos. Esse fenômeno ocorre devido à característica indutiva dos sistemas elétricos de potência, pois, na essência um indutor se opõe a variações bruscas de intensidade de correntes.

Dessa maneira, inicia-se pelo disjuntor, através da câmara de extinção contendo o meio isolante no qual o dispositivo é projetado, o processo de extinção desse arco formado no seu interior. A contar do momento em que o arco elétrico é totalmente dissipado, que ocorre exatamente no instante em que a forma de onda senoidal da sobrecorrente do sistema passa pelo zero, há recuperação das capacidades nominais térmicas e dielétricas da câmara de extinção.

No entanto, simultaneamente, os contatos do disjuntor afetado tentarão reacender o arco por ignição térmica ou por ruptura do meio dielétrico da câmara. Dessa forma, o disjuntor pode ser superado tanto por taxa de crescimento (reignição do arco) quanto por amplitude da TRT (disrupção do meio) (Melo, 2010).

Da tentativa de reignição surgirá uma tensão oscilante a uma frequência elevada chamada de frequência natural da rede e seu valor irá decair exponencialmente devido à existência de resistências dissipativas no sistema. Essa grandeza é chamada de Tensão de Restabelecimento Transitório (TRT) e a sua frequência é calculada conforme parâmetros equivalentes do sistema em análise. A Figura 7 ilustra o fenômeno do aparecimento de uma TRT.

Figura 7. Fenômeno de uma TRT.



Fonte: Modificado de Melo, 2010.

De acordo com Alves (2012), a tensão de restabelecimento transitória pode ser separada em duas fases distintas. A primeira corresponde às oscilações de alta frequência sobrepostas à onda de tensão da frequência fundamental, o que equivale à taxa de crescimento da TRT, e a segunda fase é definida pelo instante de pico severo da TRT.

Tanto o crescimento quanto o pico da TRT são requisitos para se analisar os efeitos do surgimento dessas tensões nos terminais dos disjuntores de alta tensão. Após a interrupção da corrente de curto-

circuito, estima-se que, em aproximadamente em 20 μ s o primeiro arco elétrico é extinto, fenômeno esse que provoca temperaturas extremamente elevadas na câmara de extinção próxima aos contatos do dispositivo (Alves, 2012). Após um período breve, com os contatos apartados, o pico da TRT ocorre.

As características de forma de onda e intensidade das TRTs ocasionadas em disjuntores de alta tensão está vinculada aos parâmetros do sistema de potência assim como ao tipo transitório ocorrido e o seu local de incidência. Em Alves (2006) é mostrado que faltas que ocorrem nos terminais dos disjuntores, também classificadas como faltas terminais, são mais severas que as faltas denominadas quilométricas que ocorrem em linhas de transmissão ou alimentadores próximos aos disjuntores. Dessa forma, para realização do estudo das TRTs é necessário conhecer essas magnitudes de corrente nos terminais dos disjuntores a serem especificados.

2.5. Estudo da TRT na Especificação de Disjuntores

Em Alves (2012) ainda são descritas as principais variáveis ponderadas em um estudo de TRT nos terminais de disjuntores. Elas consistem da corrente a ser interrompida pelos disjuntores, a taxa de crescimento da TRT ($TCTRT - \mu C/t$), o valor de pico da TRT(μC) e o tempo de retardo (t_d).

A primeira análise a ser desempenhada corresponde ao dimensionamento do disjuntor de alta tensão no qual deseja analisar a TRT. Dessa forma, deve-se conhecer a magnitude da máxima corrente de curto-circuito simétrica que pode ocorrer em seus terminais para que, posteriormente, seja verificado na norma

NBR 7118, qual a envoltória a ser disposta de acordo com as especificações verificadas.

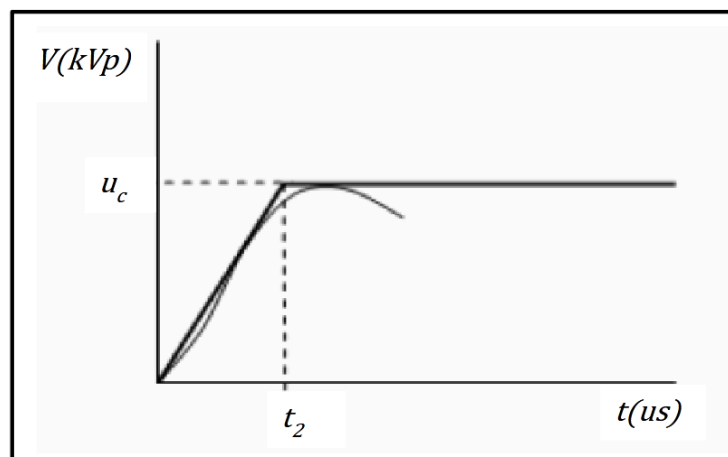
Toda TRT apresenta uma taxa de crescimento que é caracterizada pelo aumento da magnitude da ordem de kilovolts (kV) por unidade de tempo, dada em uS, também denominada como TCTRT. O valor desse crescimento é determinado a partir da primeira magnitude de tensão (U_1) da TRT verificada no instante de tempo inicial T_1 . Após interrupção do arco elétrico, em consequência a proximidade dos contatos do disjuntor, as temperaturas na câmara de extinção do acordo permanecem elevadas. Como resultado, o arco elétrico tende a aparecer pelo efeito da reignição térmica. Para se evitar a eclosão do arco, é imperativo que o tempo de resfriamento da câmara de extinção do arco elétrico seja menor que a taxa TCTRT para impedimento da ionização do meio extintor.

O conhecimento do valor de pico da forma de onda da TRT, uc, é também expresso em kV, é essencial para dimensionamento do meio dielétrico ao qual é revestido a câmara de extinção do arco no disjuntor. Após a reignição inicial, a TRT irá perdurar por determinado instante de tempo até que os contatos mecânicos do disjuntor estejam seguramente afastados. Durante esse intervalo, é de extrema importância que o meio dielétrico suporte a magnitude da TRT em questão. Dessa forma, o valor de pico da TRT será o parâmetro necessário para garantia da suportabilidade dielétrica do meio, ou seja, assegurar que não ocorrerá o rompimento dielétrico da câmara em nenhum instante.

Em Alves (2012) é descrito os dois tipos envoltórias que normalizam a TRT dimensionada para disjuntores. Em suma, elas podem ser constituídas de dois ou quatro parâmetros. O tipo de envoltória a ser

empregue varia conforme o nível de tensão máximo suportado pelo disjuntor. No presente trabalho, em consequência dos níveis de tensão do sistema de estudo inferiores a 100kV, a caracterização da envoltória é determinada por dois pontos. A Figura 8, também modificada de Alves (2012), ilustra o seu aspecto construtivo.

Figura 8. Envoltória típica de uma TRT caracterizada a dois parâmetros para disjuntores até 100kV.



Fonte: Modificado de Alves, 2012.

2.6. ATPDraw

O ATPDraw é um programa computacional para a plataforma Windows classificado como um processamento gráfico para a versão do programa ATP direcionado ao estudo de transitórios eletromagnéticos por prompt de comando (EMTP). No ATPDraw é possível, pelo controle do mouse, a montagem de circuitos elétricos através da seleção de componentes elétricos dos menus. O ATPDraw gera o arquivo de entrada ATP no formato apropriado baseado na filosofia “o que você vê é o que você obtém”. No programa ainda é possível a integração de arquivos de simulação e plotagem de gráficos (Høidalen, [s.d.]).

Dentre os principais estudos possíveis de serem realizados pode-se citar:

- Programa de transitórios eletromagnéticos;
- Análises de sistemas elétricos no domínio do tempo e da frequência;
- Estudo de descargas atmosféricas;
- Estudo de chaveamento de elementos elétricos;
- Análise de harmônicos no sistema;
- Coordenação de isolamento da proteção;
- Eletrônica de Potência e Transmissão em Corrente Contínua (HVDC);
- Máquinas Elétricas;
- Sistemas de Controle;
- Parâmetros Complexos de linhas de transmissão e cabos;

3. METODOLOGIA

A fim de dimensionar os disjuntores apropriados para o circuito, para que os elementos que o compõem possam manter suas capacidades físicas e mecânicas das quais permitem que ele continue operando da forma com a qual foram projetados para trabalhar, ao sofrer uma falta ou um curto, os seguintes dados serão calculados para conhecimento e então inserção no *software* ATP. A

partir do uso deles no programa será possível adquirir todos os parâmetros necessários que permitirão dimensionar corretamente o dispositivo de manobra adequado. Os dados que hão de ser calculados são os parâmetros dos lados de alta e baixa tensão do transformador. Os dados dos cabos utilizados são tabelados pelo fabricante e o modelo da linha de transmissão será o apresentado na Figura 9.

3.1. O Cálculo dos Parâmetros do Transformador Utilizado

Dados do Trafo:

- Transformador trifásico;
- Frequência = 60 Hz;
- Potência trifásica (S_n) = 12 MVA;
- Tensão nominal (U_n) = 69/13,8 KV;
- Ligação ΔY ;
- Impedância (Z) = 14,0%;
- Resistência (RCC) = 4,0%;
- Corrente em vazio = 0,8%;
- Perdas em vazio = 0,4%.

3.2. Cabos

Os cabos que serão utilizados para conectar todo o circuito possuem os parâmetros apresentados na Tabela 1.

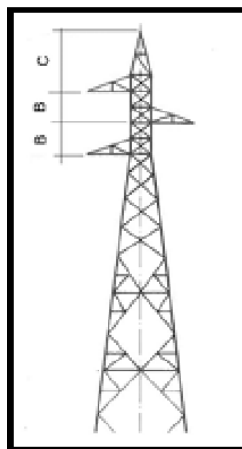
Tabela 1. Parâmetros dos cabos utilizados no sistema.

Secção mm^2	Resistência Ω / km	Indutância Ω / km	Indutância Ω / km
240	0,113	0,137	8600

Fonte: Autores, 2025.

3.3. Linha de Transmissão de Referência

Figura 9. Linha de Transmissão usada.



Fonte:

Modificada de
Souza; Chemin
Netto, 2019.

A linha de transmissão da Figura 9 assume os seguintes dados da Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da linha de transmissão.

Condutor	Raio (cm)	Resistência R_{cc} (Ω)
Fase Elgin #652,5 MCM	1,117	0,1013
Para-raios Bute #312,8 MCM	0,815	0,2113

Fonte: Autores, 2025.

3.4. Procedimentos para Dimensionamento dos Disjuntores Considerando a TRT

Considerando os parâmetros das envoltórias da TRT apresentados para o sistema modelado no ATPDraw, consideram-se os seguintes procedimentos para especificação correta dos disjuntores avaliados:

1ª etapa - Inserção de curtos-circuitos trifásicos no ATPDraw aos terminais dos disjuntores avaliados e consequente simulação. Posteriormente são medidas as correntes de curto-circuito resultantes nesses terminais.

2ª etapa - Com base no valor apurado na primeira etapa, são verificados e especificados a partir dos valores tabelados de tensão suportados pelos disjuntores da norma NBR 7118.

3ª etapa – Constatação na Tabela B.1, também disposta pela NBR 7118, dos valores padronizados das envoltórias das TRT's máximas suportadas pelos disjuntores para os respectivos níveis de tensão examinados na segunda etapa.

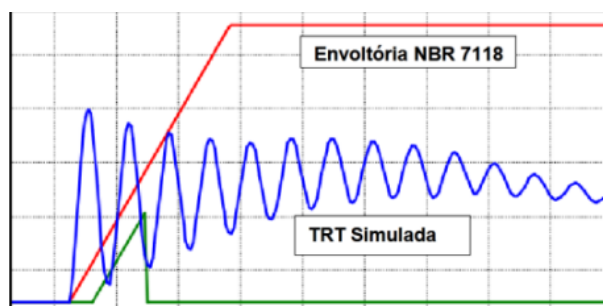
4ª etapa – Inserção dos valores tratados na terceira etapa no bloco TRT criado no ATPDraw e programação também no *software* da abertura do disjuntor em foco na análise no instante t igual a zero.

Seguidamente, é executada a simulação do sistema e a TRT é medida nos terminais do dispositivo.

5ª etapa – Nesta etapa é feita a comparação da TRT gerada pela abertura do disjuntor em análise e a envoltória construída a partir dos valores tabelados pela NBR 7118. Como resultado, há duas possíveis soluções que veriam de acordo com os resultados:

Caso a TRT avaliada para o disjuntor ultrapasse a envoltória padronizada pela NBR 7118, conforme ilustra a Figura 3, a análise é retomada na 2ª etapa considerando um nível de tensão acima do valor especificado anteriormente.

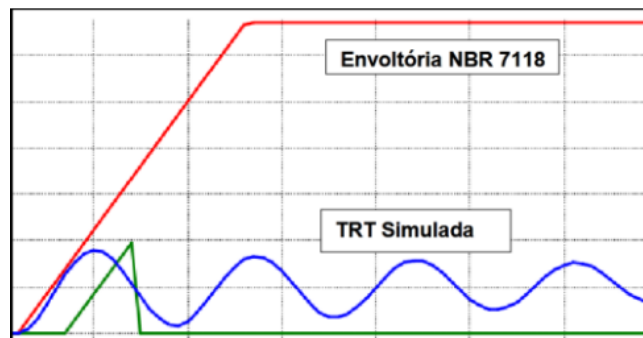
Figura 10. Caso geral para a situação de ultrapassagem da TRT gerada nos terminais do disjuntor na envoltória padronizada pela NBR 7118.



Fonte: Autores, 2025.

Caso a TRT avaliada para o disjuntor não ultrapasse a envoltória padronizada pela NBR 7118, conforme ilustrado na Figura 11, a análise é finalizada e conclui-se que o dimensionamento do disjuntor está em conformidade com as exigências da norma.

Figura 11. Caso geral para a situação de conformidade da TRT gerada nos terminais do disjuntor com a NBR 7118.



Fonte: Autores, 2025.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Cálculo dos Parâmetros do Transformador

Considerando os dados do transformador apresentados na metodologia, foram calculados os parâmetros do transformador.

Tabela 3. Cálculo de parâmetros do transformador.

Lado de alta tensão (AT)	Lado de baixa tensão (BT)
$Z_{AT} = 55,545 \ \Omega$	$Z_{BT} = 0,7405 \ \Omega$
$R_{AT} = 15,87 \ \Omega$	$R_{BT} = 0,2116 \ \Omega$
$X_{AT} = 53,2296 \ \Omega$	$X_{BT} = 0,7096 \ \Omega$
$L_1 = 70,5963 \text{ mH}$	$L_2 = 0,9411 \text{ mH}$
$R_1 = 7,935 \ \Omega$	$R_2 = 0,1058 \ \Omega$

Fonte: Autores, 2025.

Ramo de magnetização R_M

- $P_{fe} = 48\text{KW}$

- $R_M = 99187,5$

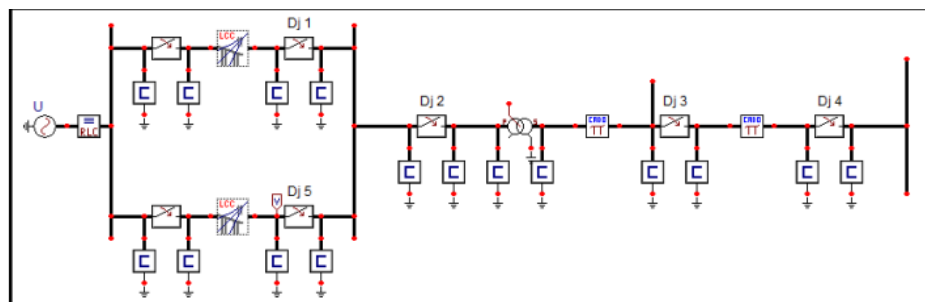
Corrente de magnetização I_0

- $I_0 = 1,1359A$

4.2. Correntes de Curto-Circuito

Com todos os cálculos já realizados, e com os dados de fabricante em mãos torna-se possível implementar, no ATP (Figura 12), o circuito do sistema escolhido. E a partir disso obtêm-se os dados de curto-circuito dos disjuntores (Tabela 3), ao inserir cargas de baixa impedância, sendo assim, tornam-se viáveis todos os ensaios apresentados a seguir.

Figura 12. Sistema escolhido construído no ATP.



Fonte: Autores, 2025.

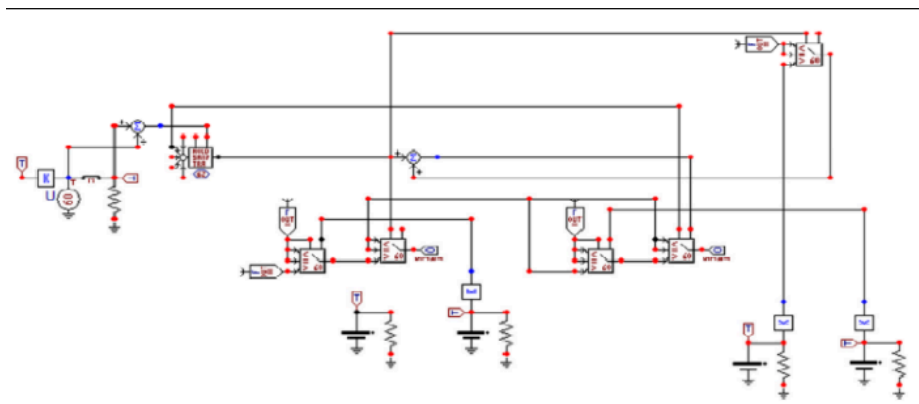
Tabela 4. Níveis de curto-circuito dos disjuntores utilizados.

Disjuntor	Nível de curto-circuito
Dj1	6.25KA
Dj2	6.25KA
Dj3	8.21KA
Dj4	7.54KA

Fonte: Autores, 2025.

Com os níveis de curto-circuitos já definidos, verifica-se a necessidade de simular as envoltórias normalizadas dos disjuntores, com o objetivo de comprovar a eficácia dos mesmos sob o evento.

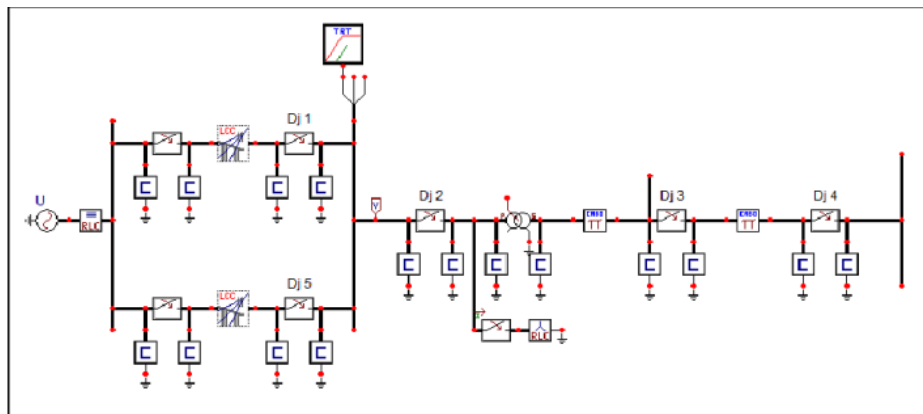
Figura 13. TACS para simulação das envoltórias.



Fonte: Autores, 2025.

A TACS acima (Figura 13) é uma sub-rotina e foi desenvolvida no próprio ATP. Nela, por meio do dispositivo Simple Track, no momento de abertura da chave, são obtidos esses dados para conseguir esboçar a envoltória a partir daquele ponto com o auxílio do Input IF, assim como das condições inseridas nele e nos parâmetros anexados na fonte de tensão. O circuito da Figura 13 foi compactado e inserido no circuito da Figura 12, resultando na configuração apresentada na Figura 14 e nos parâmetros apresentados na Figura 15.

Figura 14. TACS compactada e inserida no circuito idealizado.



Fonte: Autores, 2025.

Figura 15. Parâmetros das envoltórias.

DATA	VALUE
TCTR	0.75
KV	124
TD	8
KVRET	41

Fonte: Autores, 2025.

Tendo esses dados determinados, torna-se possível prosseguir com os ensaios dos disjuntores, visando o correto dimensionamento dos mesmos.

4.3. Avaliação da TRT dos Disjuntores

A avaliação inicial de cada um dos disjuntores (Dj1 a Dj5) foi realizada de acordo com os parâmetros apresentados abaixo.

Disjuntor Dj4

- Tensão nominal: 15 KV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 8KA

Com os dados acima, pode-se encontrar os parâmetros das envoltórias de acordo com a Tabela B.1, o que irá permitir definir os

parâmetros do disjuntor Dj4, conforme explicitado na Tabela 5.

Tabela 5. Parametrização das envoltórias do disjuntor Dj3 e Dj4.

Valor de crista da TRT (u_c)	Retardo (t_d)	Tensão (Retardo – u')	Taxa de crescimento (TCTR - u_c/t_3)
25.7KV	10 μ s	8.6KV	0.38KV / μ s

Fonte: Autores, 2025.

Disjuntor Dj3

- Tensão nominal: 15 KV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 12,5KA

Com os dados acima, pode-se encontrar os parâmetros das envoltórias de acordo com a Tabela B.1, o que irá permitir definir os parâmetros do disjuntor Dj3, conforme apresentado na Tabela 5.

Disjuntores Dj1, Dj2 e Dj5

- Tensão nominal: 72,5 KV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 12,5KA

Com os dados acima pode-se encontrar os parâmetros das envoltórias segundo a Tabela B.1, o que irá permitir definir os parâmetros dos disjuntores Dj1, Dj2 e Dj5, conforme explicitado na Tabela 6.

Tabela 6. Parametrização das envoltórias dos disjuntores Dj1, Dj2 e Dj5.

Valor de crista da TRT (u_c)	Retardo (t_d)	Tensão (Retardo – u')	Taxa de crescimento (TCTR - u_c/t_3)
124KV	8 μ s	41KV	0,75KV / μ s

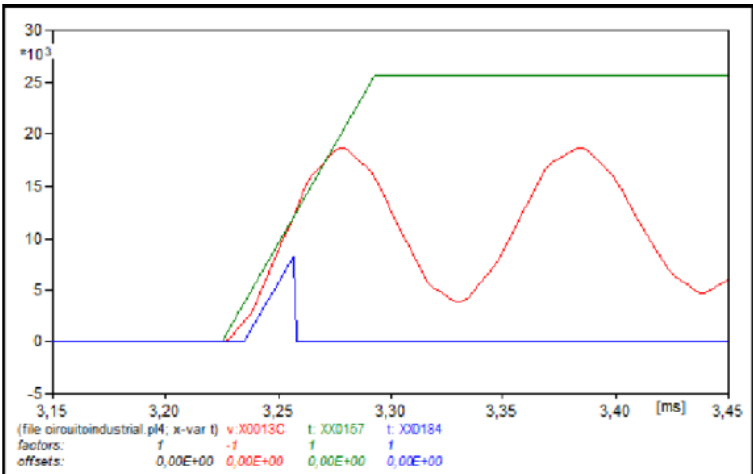
Fonte: Autores, 2025.

4.3.1. Disjuntor 04 (Dj4)

Utilizando as características de operação do disjuntor escolhido, considerando os dados de magnitude de 7,54 kA de curto-circuito, retirado da Tabela A.1, justifica-se a especificação do disjuntor Dj4.

Com a parametrização das envoltórias do disjuntor Dj4 a simulação do gráfico presente na Figura 16 pode ser apresentada.

Figura 16. TRT com as envoltórias parametrizadas do disjuntor Dj4.



Fonte: Autores, 2025.

Na Figura 16 percebe-se que a transitória ultrapassou a envoltória superior, e por este motivo uma nova análise e simulação deverá ser

realizada. Tendo em vista que novos parâmetros deverão ser calculados e por isso uma nova e superior tensão de curto-circuito deverá ser adotada.

- Tensão nominal: 15 KV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 16KA

Agora, retiram-se novamente os dados das envoltórias, mas, desta vez considerando a Tabela B.2 e gerando a Tabela 7.

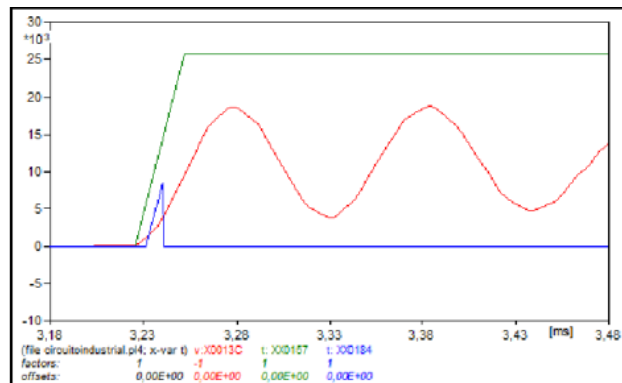
Tabela 7. Parametrização das envoltórias do disjuntor Dj4 considerando Tabela B.2.

Valor de crista da TRT (u_c)	Retardo (t_d)	Tensão (Retardo – u')	Taxa de crescimento (TCTR - u_c/t_3)
27.6KV	6 μ s	9.2KV	0.95KV / μ s

Fonte: Autores, 2025.

Então, têm-se os novos parâmetros simulados no gráfico da Figura 17 e assim, esse novo disjuntor dimensionado está adequado às normas. (Despreza-se que haja alguma influência em relação às capacitâncias de fuga nesse novo dispositivo de manobra estipulado).

Figura 17. TRT com envoltórias parametrizadas 2 do disjuntor Dj4.

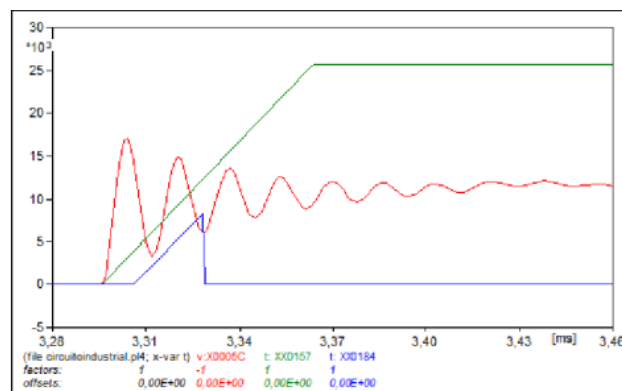


Fonte: Autores, 2025.

4.3.2. Disjuntor 03 (Dj3)

Considera-se para este disjuntor um curto-circuito de 8,21 kA. Com a parametrização das envoltórias do disjuntor Dj3 obtêm-se o resultado gerado na simulação, representada na Figura 18.

Figura 18. TRT com as envoltórias parametrizadas do disjuntor Dj3.



Fonte: Autores, 2025.

Como pode ser observado, o resultado apresentado não foi satisfatório, e, o próximo passo será considerar outros dados nominais, pois este disjuntor não suporta a TRT gerada após o curto-circuito.

- Tensão nominal: 36,2KV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 40KA

A partir desses novos dados e da Tabela B.3, são admitidas as novas parametrizações, conforme retratado na Tabela 8.

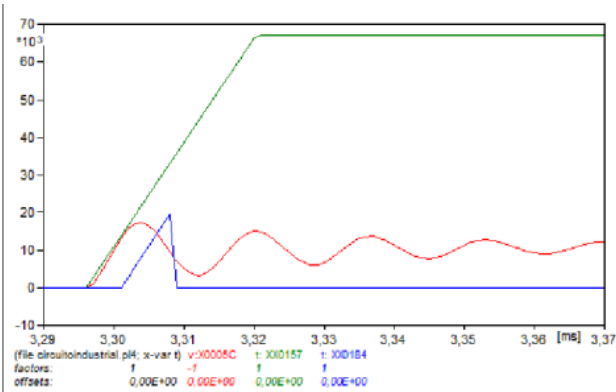
Tabela 8. Parametrização das envoltórias 2 do disjuntor Dj3.

Valor de crista da TRT (u_c)	Retardo (t_d)	Tensão (Retardo – u')	Taxa de crescimento (TCTR - u_c/t_3)
67KV	5 μ s	22KV	2.77KV / μ s

Fonte: Autores, 2025.

Obtêm-se os resultados das novas envoltórias na Figura 19.

Figura 19. TRT com envoltórias parametrizadas 2 do disjuntor Dj3.

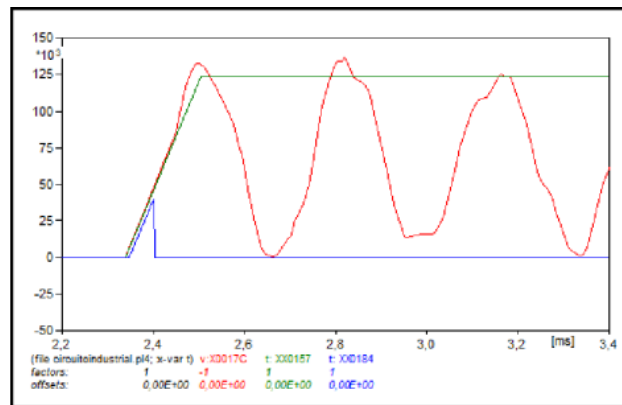


Fonte: Autores, 2025.

4.3.3. Disjuntor 02 (Dj2)

Considerando uma corrente de curto-circuito de 6,25 kA e uma tensão fase-terra de 69 kV. Com a parametrização das envoltórias do disjuntor Dj2 tem-se o resultado gerado na simulação, representado na Figura 20.

Figura 20. TRT com as envoltórias parametrizadas do disjuntor Dj2.



Fonte: Autores, 2025.

Na Figura 20, foi notado que o disjuntor dimensionado também não suportará a TRT de curto-circuito gerado. Então, o nível nominal de tensão do disjuntor deverá ser aumentado.

- Tensão nominal: 72.5 kV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 16KA

Utilizando a Tabela B.2 e os dados apresentados acima, parametriza-se os novos resultados, como mostrado na Tabela 9.

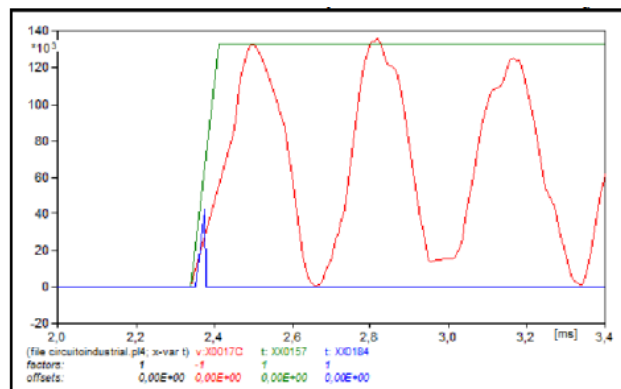
Tabela 9. Parametrização das envoltórias do disjuntor Dj2.

Valor de crista da TRT (u_c)	Retardo (t_d)	Tensão (Retardo – u')	Taxa de crescimento (TCTR - u_c/t_3)
133KV	14 μ s	44KV	1.85KV / μ s

Fonte: Autores, 2025.

O resultado é representado na Figura 21.

Figura 21. TRT com as envoltórias parametrizadas 2 do disjuntor Dj2.



Fonte: Autores, 2025.

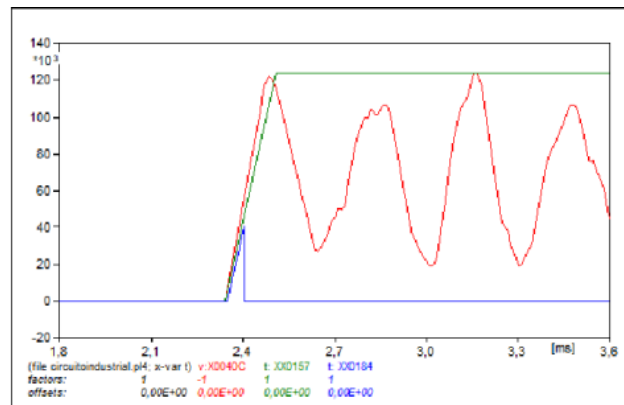
Neste disjuntor, também se despreza a atuação das capacitâncias de fuga, e é notável que essa nova magnitude permite o dimensionamento de um disjuntor que consegue suportar a TRT gerada.

4.3.4. Disjuntor 01 (Dj1)

Adota-se a corrente de curto-circuito de 6,25 kA e uma tensão fase-terra de 69 kV. Com a parametrização das envoltórias do disjuntor Dj1 tem-se o resultado gerado na simulação, representada na Figura 22.

Para a análise da TRT do disjuntor Dj1 será preciso abrir o disjuntor Dj5, gerando a TRT notavelmente destacada, como retrata a Figura 22.

Figura 22. TRT com as envoltórias parametrizadas do disjuntor Dj1.



Fonte: Autores, 2025.

Aqui também será necessário mudar os níveis nominais

- Tensão nominal: 72.5 kV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 16kA

Segundo a Tabela B.2, também são parametrizados os dados acima mostrando os resultados na Tabela 10.

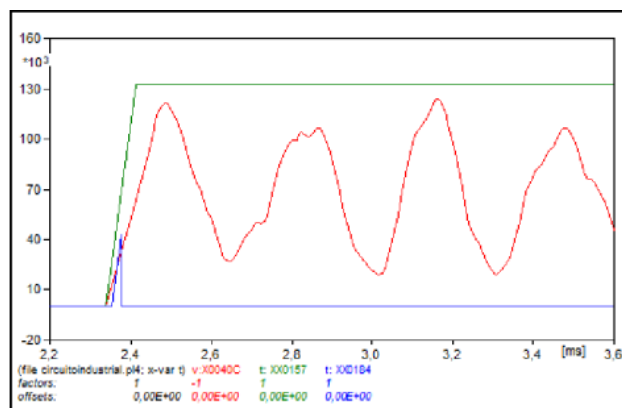
Tabela 10. Parametrização das envoltórias 2 do disjuntor Dj1.

Valor de crista da TRT (u_c)	Retardo (t_d)	Tensão (Retardo - u')	Taxa de crescimento (TCTR - u_c/t_3)
133kV	14 μ s	44kV	1.85kV / μ s

Fonte: Autores, 2025.

E então o resultado obtido é satisfatório, como mostra a Figura 23. Nesta situação as capacitâncias de fuga também serão desprezadas.

Figura 23. TRT com as envoltórias parametrizadas 2 do disjuntor Dj1.

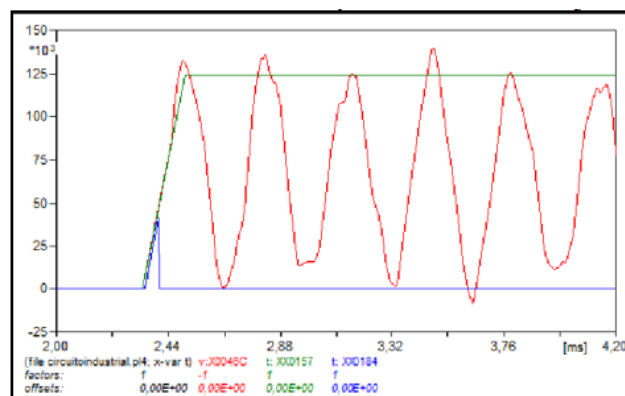


Fonte: Autores, 2025.

4.3.5. Disjuntor 05 (Dj5)

Utilizando o valor de corrente de curto-circuito de 6,25 kA e o valor da tensão fase-terra 69KV. Com a parametrização das envoltórias do disjuntor Dj5 tem-se o resultado gerado na simulação, representado na Figura 24.

Figura 24. TRT com as envoltórias parametrizadas do disjuntor Dj5.



Fonte: Autores, 2025.

As especificações também se mostram adequadas neste caso de dimensionamento.

- Tensão nominal: 72.5 KV
- Corrente suportável nominal de curta duração: 16KA

Tendo esses dados assim, bem como o acesso à Tabela B.2, as novas envoltórias são mostradas na Tabela 11.

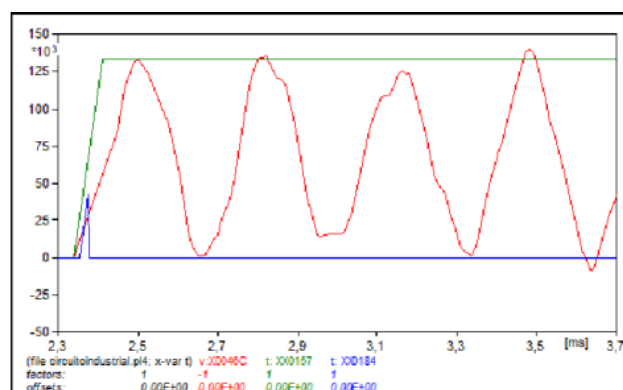
Tabela 11. Parametrização das envoltórias 2 do disjuntor Dj5.

Valor de crista da TRT (u_c)	Retardo (t_d)	Tensão (Retardo - u')	Taxa de crescimento (TCTR - u_c/t_3)
133KV	14 μ s	44KV	1.85KV / μ s

Fonte: Autores, 2025.

Com isso, obtêm-se os resultados favoráveis apresentados na Figura 25.

Figura 25. TRT com as envoltórias parametrizadas 2 do disjuntor Dj5.



Fonte: Autores, 2025.

Serão desconsideradas as capacitâncias de fuga, por serem desprezíveis, e então, percebe-se que o novo dimensionamento se encaixa nas normas, o que permite concluir que os novos parâmetros são seguros para operar nas condições propostas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenvolvimento do presente trabalho e o aprofundamento no setor de Qualidade de Energia, verificou-se que as condições para um dimensionamento mais adequado e seguro de dispositivos utilizados em sistemas de qualquer potência, especialmente nos sistemas de alta tensão, foco desta pesquisa, é algo que deve ser feito considerando não somente os níveis de curto-circuito nominal, mas também os dados presentes nas tabelas inseridas na norma, que delimitam uma porcentagem do valor nominal para utilizar e trabalhar com uma margem mais segura.

As contribuições de Júnior e Oliveira foram de extrema importância nesta pesquisa. Por meio dos trabalhos de ambos nota-se que o que fizeram foi algo similar, mas com pontos de vista diferentes, assim como suas metodologias, o que permite concluir e alcançar resultados um tanto distintos ao considerar apenas os níveis de curto-circuito e realizando os cálculos através de Transformadas de Fourier.

Este trabalho se assimila mais com a linha de pensamento de Oliveira, reafirmando que o desenvolvimento feito por ele é de fato preciso mesmo trabalhando com um circuito elétrico diferente constando dados de inserção também divergentes.

Em pesquisas posteriores, poderão ser inseridos circuitos mais complexos, ou até mesmo mais simplificados, mas que serão de mesmo impacto, pois o conhecimento gerado e o saber que a sua contribuição pode ocasionar em uma disseminação de que há vários requisitos a serem levados em conta a fim de projetar um sistema que opere com mais segurança é realmente algo que pode impactar positivamente o autor e/ou desenvolvedor.

Portanto, com esta pesquisa, observou-se que as alterações de carga que todos os sistemas de energia sofrem devem ser meticulosamente verificadas, pois é dessa forma que um disjuntor adequado pode ser projetado para operar em certo ponto de determinado circuito protegendo, assim, todos os elementos ali inseridos, que têm por finalidade ajudar na atuação e funcionamento de todo um complexo elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, F. R. **Características do disjuntor para abertura de linha em vazio**: metodologia de estudo. 2006. 159 fs. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 2006.

ALVES, Rimon de Oliveira. **Tensão de restabelecimento transitória (TRT)**. 2012. Monografia (Especialização em Sistemas de Energia Elétrica – Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7118**: Disjuntores de alta tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

China Disjuntor De Vácuo Para Alta Tensão Externa. Disponível em: <http://pt.nstransformer.com/vacuum-circuit-breaker/44528348.html>. Acesso em: 18 jul. 2025.

COSTA, Arthur; TAVARES, Carlos Eduardo; OLIVEIRA, José Carlos de; REZENDE, Paulo Henrique; NOGUEIRA, Isaque. Obtenção das curvas de suportabilidade dielétrica e térmica de aparelhos condicionadores de ar para análise de ressarcimento de danos a consumidores. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 8, n. 1, jul. 2014.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. [s.l.] The McGraw-Hill Companies, 2004. Acesso em: 18 jul. 2025.

GREENWOOD, A. **Electrical Transients In Power Systems**. 2. ed. United States Of America: John Wiley & Sons, Inc, 1991.

HØIDALEN, H. K. **ATPDraw Home**. Disponível em: <https://www.atpdraw.net/>. Acesso em: 9 jun. 2025.

J DUNCAN GLOVER; OVERBYE, T. J.; SARMA, M. S. **Power System Analysis & Design**. 6. ed. Boston, Ma: Cengage Learning, 2017.

JÚNIOR, J. H. **Cálculo Da Tensão De Restabelecimento Transitória No Domínio Da Frequência**. Dissertação De Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica: [s.n.]

MELO, Luiz Gianini Bezerra de. **Estudo de tensão de restabelecimento transitória: avaliação e medidas mitigadoras**. 2010. Projeto de Engenharia Elétrica (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2010.

OLIVEIRA, H. C. **Condicionadores De Ar Inverter**: Modelagem Computacional E Curvas De Suportabilidade Para Estudos De Pedidos De Ressarcimento Por Danos Elétricos. [s.l: s.n.]. Acesso em: 30 jul. 2025.

PAULILLO, G.; DUARTE TEIXEIRA, M.; BACCA, I. **Transitórios**. [s.l: s.n.]. Acesso em: 28 maio. 2025.

PINTO, M. P. Arco Elétrico: Guia Completo. Disponível em: <https://www.cursonr10.com/arco-eletrico/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

SOUZA, M. A.; CHEMIN NETTO, U. **Modelo E Análise Do Impacto Da Supercompactação De Linhas De Transmissão Urbanas 138kV Da Copel Nas Sobretensões Transitórias Com Uso Do Software ATP**. nov. 2019.

ANEXO A – TABELA COM VALORES NOMINAIS DOS DISJUNTORES

Tabela A.1 - Tabela de coordenação dos valores nominais dos disjuntores, para tensões nominais inferiores ou iguais a 72,5KV										
Tensão nominal	Corrente suportável nominal de curta duração	Corrente nominal								
kV (eficaz)	kA (eficaz)	A (eficaz)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7,2	8	400								
	12,5	400	630	800	1250					
	16		630	800	1250	1600	2000			
	25		630	800	1250	1600	2000	2500	3150	
	40				1250	1600	2000	2500	3150	4000
15	8	400								
	12,5		630	800	1250					
	16		630	800	1250	1600	2000	2500	3150	
	25				1250	1600	2000	2500	3150	
	40				1250	1600	2000	2500	3150	
24,2 ^(A)	8	400								
	12,5		630	800	1250					
	16		630	800	1250					
	25,5				1250	1600		2500		
	40				1250	1600		2500		4000
36,2 ^(A)	8									
	12,5		630	800	1250					
	16		630	800	1250	1600				
	25				1250	1600		2500		
	40					1600		2500		4000
72,5 ^(A)	12,5			800	1250					
	16			800	1250					
	20				1250	1600	2000			
	31,5				1250	1600	2000			

ANEXO B – TABELAS COM VALORES DE TRT SEGUNDO NBR 7118

Tabela B.1 - Valores de TRT presumida para curto-circuito nos terminais com 100% I - Tensões nominais inferiores ou iguais a 72,5KV - Representação por dois parâmetros - Fator de primeiro polo 1,5

Tensão nominal	Valor de crista da TRT	Tempo	Retardo	Tensão	Tempo	Taxa de crescimento
U_n	u_c	t_s	t_d	u'	t'	u_c/t_s
kV	kV	μs	μs	kV	μs	kV/ μs
1	2	3	4	5	6	7
7,2	12,3	52	8	4,1	25	0,24
15,0	25,7	66	10	8,6	33	0,38
24,2 ^(A)	41	90	14	14	44	0,46
36,2 ^(A)	62	111	17	21	54	0,56
72,5	124	166	8	41	64	0,75

Onde: $u_c = 1,4 \cdot 1,5 \sqrt{\frac{2}{3}} U_n$

Tabela B.2 - Valores da TRT presumida para curto-circuito nos terminais com 60% I - Tensões nominais inferiores ou iguais a 72,5KV - Representação por dois parâmetros - Fator de primeiro polo 1,5

Tensão nominal	Valor de crista da TRT	Tempo	Retardo	Tensão	Tempo	Taxa de crescimento
U_n	u_c	t_s	t_d	u'	t'	u_c/t_s
kV	kV	μs	μs	kV	μs	kV/ μs
1	2	3	4	5	6	7
7,2	13,2	22	4	4,4	12	0,60
15,0	27,6	29	6	9,2	15	0,95
24,2 ^(A)	44	39	8	15	21	1,14
36,2 ^(A)	67	47	9	22	25	1,41
72,5	133	72	14	44	38	1,85

Onde: $u_c = 1,5 \cdot 1,5 \sqrt{\frac{2}{3}} U_n$

Tabela B.3 - Valores da TRT presumida para curto-circuito nos terminais com 10% I ou 30% I - Tensões nominais inferiores ou iguais a 72,5KV - Representação por dois parâmetros - Fator de primeiro polo 1,5

Tensão nominal	Valor de crista da TRT	Tempo	Retardo	Tensão	Tempo	Taxa de crescimento
U_n	u_c	t_s	t_d	u'	t'	u_c/t_s
kV	kV	μs	μs	kV	μs	kV/ μs
1	2	3	4	5	6	7
7,20	13,2	11	2	4,4	6	1,20
15,0	27,6	14	3	9,2	7	1,97
24,2 ^(A)	44	19	4	15	10	2,34
36,2 ^(A)	67	24	5	22	13	2,77
72,5	133	36	7	44	19	3,70

Onde: $U_c = 1,5 \cdot 1,5 \sqrt{\frac{2}{3}} U_n$

¹ Bacharela em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Docente da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Docente da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Docente da Universidade do Estado de Minas Gerais, Campus Ituiutaba. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)