

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Aquiles Saccol Borin

**SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR TENSÃO
DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA NO DOMÍNIO DA
FREQUÊNCIA**

Santa Maria, RS
2021

Aquiles Saccol Borin

SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração de Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Ghendy Cardoso Jr., Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2021

BORIN, AQUILES
SUPERACÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR TENSÃO DE
RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA /
AQUILES BORIN.- 2021.
62 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2021

1. Tensão de restabelecimento transitória 2. Domínio da
frequência 3. Transitório 4. Disjuntores 5. Subestação I.
Cardoso Junior, Ghendy II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2021

Todos os direitos autorais reservados a Aquiles Saccol Borin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: aquilesborin@gmail.com

Aquiles Saccol Borin

SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração de Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovada em 30 de dezembro de 2021.

Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)

Videoconferência (Presidente/Orientador)

Luiz Fernando de Freitas Gutierrez, Dr. (UFSM)

Videoconferência

Chrystian Dalla Lana da Silva, Dr. (Unipampa)

Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Dalva e Reginaldo, por serem os exemplos em que me inspiro;
A minhas irmãs Jaquiélen e Jéssica e cunhados José e Carlos pelo apoio e incentivo;

Ao professor Ghendy Cardoso Jr. pela excelente orientação e pela confiança em momentos de dúvida;

Aos colegas do Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES-CEESP) em especial a Jean Rossini, Mairon Gallas, Aldair Wontroba, Leyla Kraulich e Kaynan Maresch;

Aos colegas da Universidade Federal do Pampa pelo apoio e compreensão. Em especial a Clayton Garcia, Antonio Munhoz, Vivian Netto, Sthefania Habeyche, Julia da Cunha e Adriane Denardi;

À Universidade Federal de Santa Maria pelo ensino gratuito e de qualidade;

À Universidade Federal do Pampa pelo incentivo a qualificação;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e seu corpo de servidores pelo auxílio durante este trabalho;

Aos amigos Franciano Puhales, Alexandre Soares, Leonardo Brondani, Fernando Alves, Débora Vidor, Mariana Soares, Priscila Vidor e Pablo Oliveira que andaram ao meu lado nessa caminhada;

Aos demais não citados aqui nominalmente, mas que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

RESUMO

SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO POR TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

AUTOR: Aquiles Saccol Borin
ORIENTADOR: Ghendy Cardoso Junior

Este trabalho propõe o uso de uma técnica no domínio da frequência para a obtenção da tensão de restabelecimento transitória em disjuntores de alta tensão. Os métodos tradicionais de análise da superação de disjuntores por tensão de restabelecimento transitória são baseados em simulações no domínio do tempo. A complexidade do estudo e o grande número de equipamentos que necessitam ser analisados exigem o emprego de métodos que requerem menor esforço computacional, mas com um nível de precisão aceitável. Essas simulações exigem muita atenção do operador devido à quantidade de equipamentos e ao tempo necessário para serem processadas. O método proposto utiliza a impedância equivalente do sistema e a corrente de curto-circuito que o disjuntor irá interromper, ambos no domínio da frequência. A tensão de restabelecimento transitória é calculada a partir desses dois elementos e convertida para o domínio do tempo. Os resultados foram apresentados considerando três topologias do sistema elétrico e comparados aos resultados no domínio do tempo. O método apresentado neste trabalho pode ser uma alternativa às técnicas tradicionais de cálculo de tensão de restabelecimento transitória, reduzindo a complexidade do sistema e aumentando a velocidade de processamento.

Palavras-chave: Tensão de restabelecimento transitória. Domínio da frequência. Transitório. Disjuntores. Subestação.

ABSTRACT

HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKER SURPASSING BY TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE IN THE FREQUENCY DOMAIN

AUTHOR: Aquiles Saccol Borin
ADVISOR: Ghendy Cardoso Junior

This paper proposes the use of a frequency domain technique to obtain the transient recovery voltage in high voltage circuit breakers. Traditional methods for analyzing circuit breaker transient recovery voltage are based on time-domain simulations. The complexity of the study and the large number of devices that need to be analyzed require methods that demand less computational effort while maintaining an acceptable level of accuracy. These simulations require significant attention from the operator due to the large number of devices and the lengthy processing times. The proposed method uses the equivalent impedance of the system and the short-circuit current that the circuit breaker will interrupt, both in the frequency domain. The transient recovery voltage is calculated from these two elements and converted to the time domain. The results were presented considering three electrical system topologies and compared to time-domain results. The method presented in this paper may be an alternative to traditional transient recovery voltage calculation techniques, reducing system complexity and increasing processing speed.

Keywords: Transient recovery voltage. Frequency domain. Transients in power systems. Circuit Breakers. Substations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corrente e tensão na abertura de um disjuntor	17
Figura 2 – Tensão de restabelecimento transitória	18
Figura 3 – Tensão de restabelecimento transitória simétrica e assimétrica	19
Figura 4 – Disjuntor não superado	21
Figura 5 – Disjuntor superado por tensão de restabelecimento transitória	21
Figura 6 – Envoltória de dois parâmetros.....	22
Figura 7 – Envoltória de quatro parâmetros	22
Figura 8 – Tensão de restabelecimento transitória exponencial	23
Figura 9 – Tensão de restabelecimento transitória oscilatória	24
Figura 10 – Tensão de restabelecimento transitória triangular.....	24
Figura 11 – Arco elétrico a partir da abertura dos contatos do disjuntor	26
Figura 12 – Circuito LC	28
Figura 13 – Resposta do circuito de frequência simples sem amortecimento (sem a consideração de resistor)	32
Figura 14 – Resposta do circuito de frequência simples com amortecimento (com a consideração de resistor)	33
Figura 15 – Circuito de frequência dupla.....	34
Figura 16 – Resposta do circuito de frequência dupla sem amortecimento	37
Figura 17 – Resposta do circuito de frequência dupla com amortecimento	37
Figura 18 – Circuito de frequência dupla modelado no ATPDraw.....	39
Figura 19 – Sistema teste.....	41
Figura 20 – Sistema teste para a obtenção da impedância no domínio da frequência	41
Figura 21 – Seleção de parâmetros no <i>software</i> ATPDraw.....	42
Figura 22 – Representação da PlotXY do <i>software</i> ATP.....	43
Figura 23 – Gráfico resultante da impedância do sistema no domínio da frequência	43
Figura 24 – Configuração no <i>software</i> HarmZs dos parâmetros para resposta em frequência.....	44
Figura 25 – Gráfico resultante da aplicação dos dados no <i>software</i> HarmZs	45
Figura 26 – Função semisseno	46
Figura 27 – Simulação x Método FFT: sistema teste	47
Figura 28 – Sistema Interligado Nacional: Região Sul	48
Figura 29 – Sistema com duas barras de fronteira.....	49
Figura 30 – Resposta em frequência do sistema com duas barras de fronteira.....	50
Figura 31 – Sistema malhado.....	51
Figura 32 – Módulo de $Z(\omega)$ do sistema malhado	53
Figura 33 – Resposta em frequência no plano $Re \times Im$	53
Figura 34 – Método FFT x Simulação ATPDraw: sistema com duas barras de fronteira	54
Figura 35 – Método FFT x Simulação ATPDraw: sistema malhado	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistema teste.....	40
Tabela 2 – Equivalentes e equipamentos do sistema com duas barras de fronteira.....	50
Tabela 3 – Equivalentes do sistema malhado.....	52
Tabela 4 – Linhas de transmissão.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
LT	Linha de Transmissão
LTK	Lei das Tensões de Kirchhoff
TCTRT	Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória
TRT	Tensão de restabelecimento transitória
SIN	Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	ESTADO DA ARTE	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES	16
2.1	DISJUNTORES	16
2.2	TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA	18
2.3	SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES	20
2.4	FORMAS DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA	23
2.5	ARCO ELÉTRICO	25
3	CÁLCULOS DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA	28
3.1	EXPRESSÃO ANALÍTICA DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA.....	28
3.1.1	Circuito de frequência simples.....	28
3.1.2	Circuito de frequência dupla	33
3.2	MÉTODO IEEE C37.011-2019 e simulações via ATPDraw	38
4	METODOLOGIA.....	40
4.1	MÉTODO FFT	40
4.1.1	Obtenção de $Z(\omega)$	40
4.1.2	Obtenção de $I_{cc}(t)$	45
4.1.3	Método FFT no MATLAB	46
4.2	SISTEMA PROPOSTO.....	48
4.2.1	Sistema com duas barras de fronteira.....	49
4.2.2	Sistema malhado	51
5	RESULTADOS	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICE A – DADOS HARMZS	59

1 INTRODUÇÃO

Os disjuntores em um sistema de potência têm por finalidade interromper a corrente elétrica, seja ela de carga, sobrecarga ou curto-circuito, isolando eletricamente o sistema. Além de ter a capacidade de interromper a corrente de curto-circuito, o disjuntor deve suportar o rápido aumento da diferença de potencial entre os seus polos. Ademais, devido às características predominantemente indutivas de um sistema de potência, ao abrir os polos do disjuntor, o sistema tende a continuar conduzindo corrente, o que pode ser observado pelo rápido aumento da tensão entre os terminais do disjuntor. Essa tensão, nos primeiros instantes, é maior e possui uma taxa de crescimento superior à tensão nominal do sistema. A norma IEEE 37.011 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2019) define este fenômeno como tensão de restabelecimento transitória (TRT). Após transcorrido o período transitório, a tensão entre os terminais normaliza-se, passando a ser chamada de tensão de restabelecimento.

Caso o dielétrico gerado entre os polos do disjuntor não seja capaz de suportar a diferença de potencial entre os polos, a corrente de curto-circuito reiniciará, rompendo o dielétrico do disjuntor. Caso não consiga suportar a tensão entre seus polos, o disjuntor é considerado superado por TRT. A superação por TRT ocorre de duas maneiras: pelo valor máximo da amplitude da TRT e pela taxa de crescimento da TRT.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é fazer uso de uma metodologia baseada no domínio da frequência para estudos de TRT, a fim de tornar o processo de identificação e análise de disjuntores mais dinâmico e simples.

Como objetivos específicos, este trabalho visa:

- diminuir o tempo necessário para análise de TRT em vários disjuntores;
- apresentar uma alternativa aos estudos tradicionais de TRT.

1.2 JUSTIFICATIVA

O constante aumento de demanda de energia elétrica faz com que o sistema elétrico de potência esteja em constante crescimento. Além da sua expansão, o sistema elétrico de potência também tem aumentado a malha de interconexões entre as subestações já existentes, o que, por consequência, eleva sua confiabilidade.

Com essas novas linhas de transmissões, os níveis de curto-circuito e características elétricas são modificados, influenciando equipamentos já instalados nas subestações. Estes equipamentos foram projetados para operar em condições diferentes daquelas às quais estão submetidos atualmente.

O disjuntor de potência é um dos equipamentos afetados pela ampliação do sistema elétrico. Além do aumento dos níveis de curto-circuito, as TRTs a que os disjuntores serão submetidos também mudarão de características. Logo, novos estudos de superação de disjuntores devem ser feitos, com o intuito de identificar quais equipamentos estão aptos a suportar esta nova demanda.

O estudo tradicional de superação de disjuntores por TRT é realizado no domínio do tempo, o que é uma tarefa bastante especializada e trabalhosa. O uso de técnicas de simulação de TRT no domínio da frequência pode contribuir para diminuir o tempo de simulação e a complexidade da parametrização do sistema.

1.3 ESTADO DA ARTE

A IEEE C37.011 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2019) define o fenômeno e apresenta um guia para aplicação de TRT em disjuntores acima de 1.000 V. A IEEE C37.04 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2018) apresenta os parâmetros preestabelecidos de disjuntores de alta tensão para a envoltória de suportabilidade do disjuntor em TRTs.

O uso de metodologias no domínio da frequência, como a de Ametani (1973), já indicava o uso da transformada de Fourier para estudos de fenômenos transitórios. Porém, a velocidade computacional tornava as operações de transformada de Fourier lentas.

Semlyen e Dabuleanu (1975) propuseram um método de cálculo de transientes usando convoluções recursivas, que diminuía o tempo de simulação sem perder a fidelidade dos parâmetros dependentes da frequência.

Com os estudos de Cooley e Tukey (1965), Brigham (1974) e Nussbaumer (1982), a transformada de Fourier pode ser calculada com maior eficiência pelas máquinas, o que tornou seu uso viável. Essa técnica foi chamada de transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT). A FFT é um método eficiente de calcular a *Discrete Fourier Transform* (DFT) de uma série temporal.

Para cálculo de TRT, Steurer, Hribernik e Brunke (2004) propuseram uma metodologia que unia a resposta em frequência de um transformador com a injeção de uma corrente de curto-circuito com forma triangular, em que a inclinação da forma de onda está relacionada à derivada da corrente de falta do equipamento. O uso da corrente triangular ou dente de serra foi uma solução, pois, quando transformada para o domínio da frequência, a corrente possui correspondência em diversas frequências, podendo assim interagir na convolução com impedâncias de frequências variadas. Casou-se somente uma corrente senoidal de 60Hz, a corrente no domínio da frequência só iria interagir com a impedância da mesma frequência.

A partir da resposta em frequência da impedância de curto-circuito do transformador, é injetada a corrente de curto-circuito, convertida ao domínio da frequência, para a obtenção do espectro em frequência da TRT. Uma vez em posse do vetor do espectro em frequência da TRT, usa-se a transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), restabelecendo o sinal no domínio do tempo. O uso de um sinal de corrente triangular para representar a corrente no domínio da frequência solucionou o problema com a convolução, porém o sinal de TRT no domínio do tempo era fiel somente ao início da TRT, ou seja, sua taxa de crescimento. Já os valores de crista diferiam muito do sinal original.

Steurer, Hribernik e Brunke (2004) demonstraram ser possível o uso de técnicas no domínio da frequência para encontrar TRT de forma rápida.

Sinder (2007) propôs um método semelhante ao método de Steurer, Hribernik e Brunke, porém com o uso de uma corrente de curto-circuito adaptada em um semisseno, no qual é possível manter as características da corrente, bem como expandi-la em frequências diferentes da fundamental, possibilitando assim a sua interação com outras frequências. Esse método é conhecido como método FFT.

Silva (2015), por sua vez, propôs a simulação de TRT no domínio da frequência com a injeção de corrente cossenoidal no disjuntor por meio do método Transformada Rápida de Fourier. Outro autor, Preto (2017), propôs o uso da superposição de fontes no domínio da frequência para a simulação da Taxa de Crescimento da TRT (TCTRT).

Ainda, Zenetta Junior (2020) propôs o método de superposição de fontes no domínio da frequência para a simulação de TRT para faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra, trifásicas não aterradas e trifásicas aterradas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo, que possui carácter introdutório, o restante deste trabalho é estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: caracterização da superação de disjuntores;
- Capítulo 3: apresentação dos métodos de cálculo e análise de TRT;
- Capítulo 4: apresentação da metodologia proposta no domínio da frequência;
- Capítulo 5: avaliação dos resultados obtidos pelos métodos aplicados;
- Capítulo 6: conclusões em relação ao desempenho do método estudado e sugestões para trabalhos futuros.

2 SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

O presente capítulo trata de assuntos introdutórios ao conceito de interrupção de corrente pelo disjuntor e da tensão de restabelecimento transitória (TRT). Serão abordadas as principais características desse tipo de efeito, as normas e as formas de análise de TRT.

2.1 DISJUNTORES

A condição mais severa a que um disjuntor de potência pode se sujeitar é a interrupção de um curto-circuito. Logo, este é o parâmetro principal para a escolha de um disjuntor de subestação.

O disjuntor é escolhido com base em dois parâmetros: tensão de operação e corrente máxima de curto-circuito.

Um disjuntor é considerado superado quando não é capaz de suportar um desses critérios:

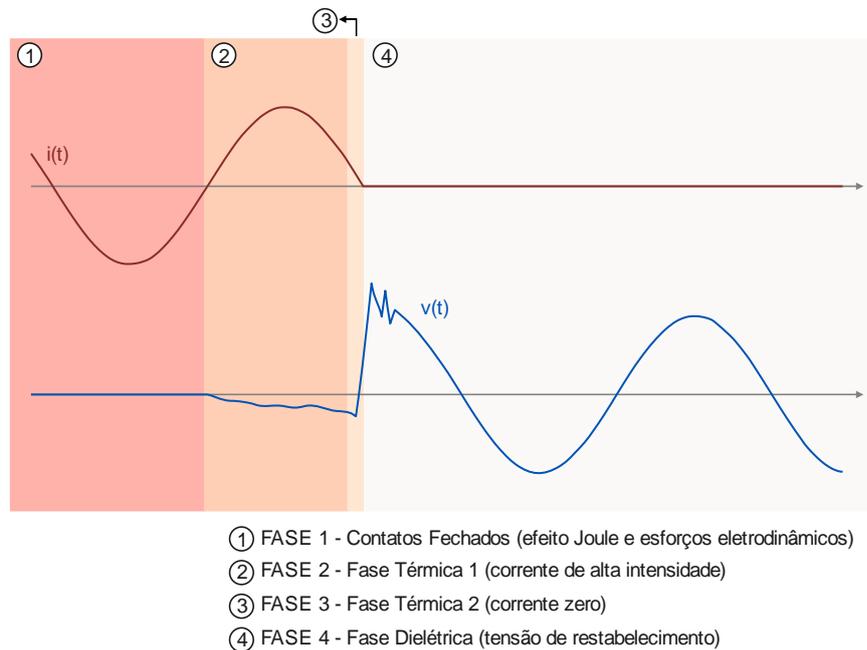
- corrente de carga;
- corrente de curto-circuito simétrica;
- corrente de curto-circuito assimétrica;
- crista da corrente de curto-circuito;
- tensão de restabelecimento transitória.

Pode-se notar que os quatro primeiros itens são diretamente ligados à corrente. Já o último item trata-se de um efeito posterior à interrupção de corrente.

Os disjuntores são classificados em quatro tipos, tendo em vista a forma da extinção do arco elétrico. São eles disjuntor isolado a SF₆, a óleo, a ar comprimido e a vácuo.

A Figura 1 ilustra as quatro fases de interrupção de corrente de um disjuntor. Segundo Meirelles (2006), são elas: contatos fechados, fase térmica 1, fase térmica 2 e fase dielétrica.

Figura 1 – Corrente e tensão na abertura de um disjuntor



Fonte: Adaptado de Alves (2006).

Na fase 1, os contatos do disjuntor ainda estão fechados e a corrente flui pelos contatos principais do disjuntor. Os efeitos predominantes nessa etapa são os esforços eletrodinâmicos nos contatos e o efeito Joule.

Já a fase 2 apresenta o instante de abertura dos contatos do disjuntor. Devido às características indutivas do sistema, a corrente tende a continuar fluindo, neste caso, através do ar na forma de arco elétrico. Nesse momento, é possível perceber o surgimento de uma pequena tensão entre os terminais do disjuntor.

A fase 3, por sua vez, apresenta o arco elétrico extinguindo-se no momento da passagem por zero, ocorrendo a interrupção da corrente entre os contatos do disjuntor e o início da TRT.

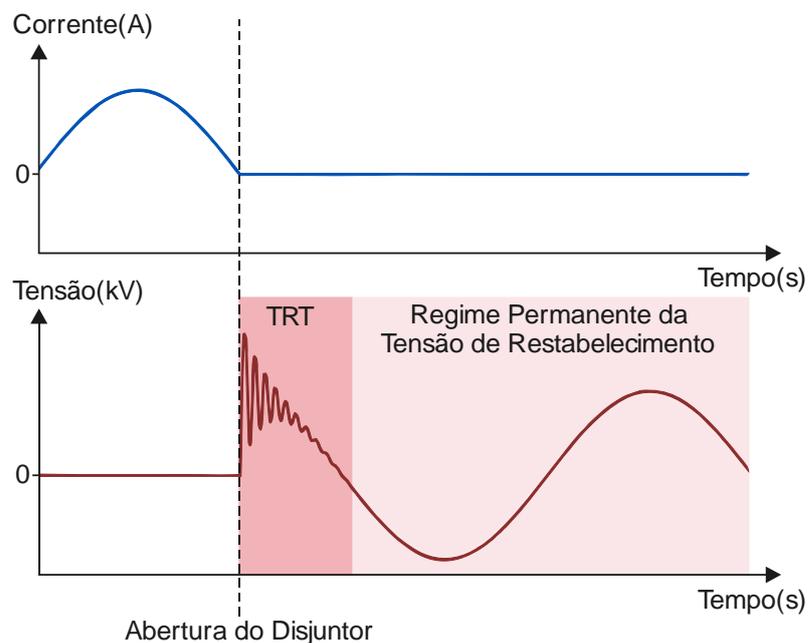
Por fim, a fase 4 demonstra a interrupção total da corrente e o surgimento da TRT, a qual ocorre devido às mesmas características indutivas do sistema, que, no momento da interrupção da corrente, eleva rapidamente a tensão nos terminais do disjuntor. Posteriormente, a tensão de restabelecimento pode ser observada nos terminais do disjuntor.

2.2 TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

Tensão de restabelecimento transitória (TRT) é o nome dado à tensão transitória que surge entre os polos de um disjuntor ou chave ao interromper a corrente de um circuito ou sistema. É um fenômeno caracterizado por ser de alta frequência e oscilatório, atingindo níveis de tensão maiores que a tensão nominal do sistema. É um fenômeno que pode ser observado na abertura de um circuito RLC simples, estendendo-se a sistemas mais complexos.

Quando o dielétrico de um disjuntor não é capaz de suportar a TRT criada entre seus terminais, a corrente elétrica volta a fluir pelo arco elétrico, rompendo o dielétrico e ocasionando falha na interrupção da corrente elétrica e a possível inviabilização do disjuntor. A Figura 2 apresenta uma demonstração gráfica da TRT.

Figura 2 – Tensão de restabelecimento transitória



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

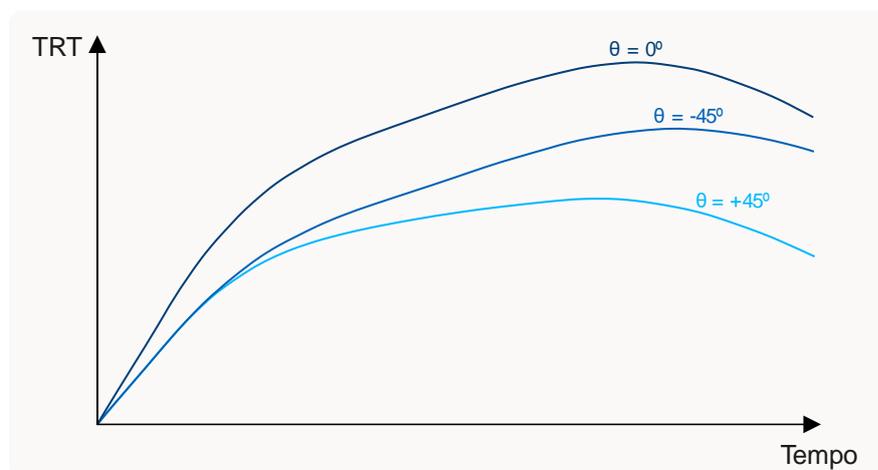
Após a interrupção da corrente na passagem por zero, a tensão entre os terminais do disjuntor sobe com uma elevada taxa de crescimento e amplitude maior que a tensão de operação do sistema. Por ser um sistema predominantemente indutivo, a corrente, ao ser interrompida, pelo disjuntor, tende a continuar fluindo,

porém, com a abertura dos contatos e a criação do dielétrico entre os terminais, essa tendência de continuação de corrente é convertida em uma elevação de tensão entre os terminais dos disjuntores. A TRT ocorre em um pequeno espaço de tempo, sendo geralmente analisada na escala de μs . Após o período transitório, a tensão entre os terminais do disjuntor é restabelecida na tensão de operação do sistema, sendo chamada de tensão de restabelecimento.

Caso um disjuntor não seja capaz de superar a TRT entre os seus terminais, o curto-circuito é reiniciado e o disjuntor é considerado superado. Um disjuntor é considerado superado por TRT quando a tensão excede os limites de suportabilidade do disjuntor. Esses limites são chamados de envoltória, que é uma representação da força do campo dielétrico entre os contatos do disjuntor e que podem ser superados de duas maneiras, pela taxa de crescimento da TRT e pelo valor de crista da TRT.

Para estudos de TRT, os curtos-circuitos mais utilizados são os trifásicos simétricos. Segundo Sinder (2007), a interrupção de uma corrente de curto-circuito simétrico, em que a defasagem de tensão e corrente é de aproximadamente 90° nos sistemas de alta tensão, leva à maximização da TRT, devido à interrupção ocorrer no instante próximo ao máximo valor da tensão do sistema. Isso torna a TRT de abertura de um curto-circuito trifásico simétrico superior à interrupção de curto-circuito assimétricos. A Figura 3 da CIGRÉ (1990), em que foram ensaiados diferentes curtos-circuitos relacionando a influência da assimetria na TRT.

Figura 3 – Tensão de restabelecimento transitória simétrica e assimétrica



Fonte: Adaptado de CIGRÉ (1990).

Na Figura 3, θ refere-se ao ângulo de abertura da chave, variando na senoide da corrente de -45° a 45° . A curva superior, em que $\theta = 0^\circ$ mostra a envoltória da TRT de um disjuntor que interrompe uma corrente simétrica. As curvas inferiores demonstram as envoltórias da TRT para a interrupção para correntes assimétricas, com pontos de abertura de -45° e $+45^\circ$ da defasagem entre corrente e tensão. Por esse motivo, os estudos de TRT são feitos em curtos-circuitos simétricos.

2.3 SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

O disjuntor pode ser considerado superado por TRT quando a taxa de crescimento ou a crista de TRT forem maiores que a sua capacidade. Esses dados são apresentados por meio da envoltória do disjuntor. A norma IEEE C37.06 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017) estabelece os parâmetros para a envoltória de cada disjuntor.

As duas formas de um disjuntor ser superado por TRT são:

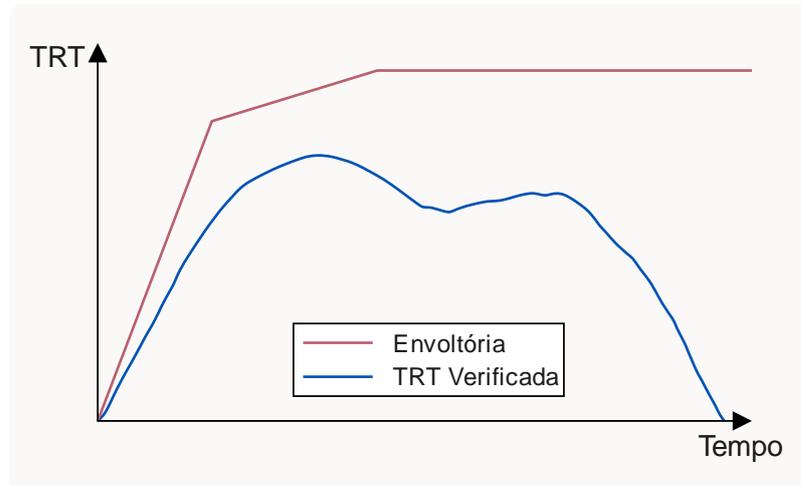
- valor de crista de TRT, medido em kV;
- taxa de crescimento da TRT.

As Figuras 4 e 5 representam a envoltória de um disjuntor (em vermelho) e a TRT à qual este disjuntor está sujeito (em azul). Para valores de tensão que ultrapassem a linha da envoltória, o disjuntor será considerado superado. Isso significa que o equipamento corre o risco de falhar e reiniciar o curto-circuito que extinguiu instantes antes, danificando a si próprio e aos equipamentos que serão submetidos ao curto-circuito.

A Figura 4 apresenta uma TRT que não ultrapassa os limites da envoltória. Logo o disjuntor analisado está apto a suportar essa TRT.

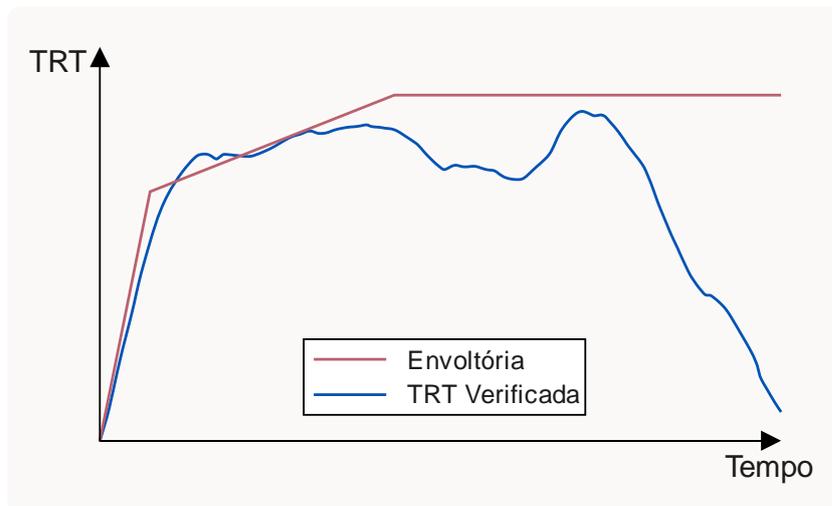
Já a Figura 5 apresenta um disjuntor que foi superado por TRT. A TRT ultrapassa os limites da envoltória na sua crista de tensão. Nesse caso, o disjuntor é considerado superado.

Figura 4 – Disjuntor não superado



Fonte: Adaptado de Sinder (2007).

Figura 5 – Disjuntor superado por tensão de restabelecimento transitória

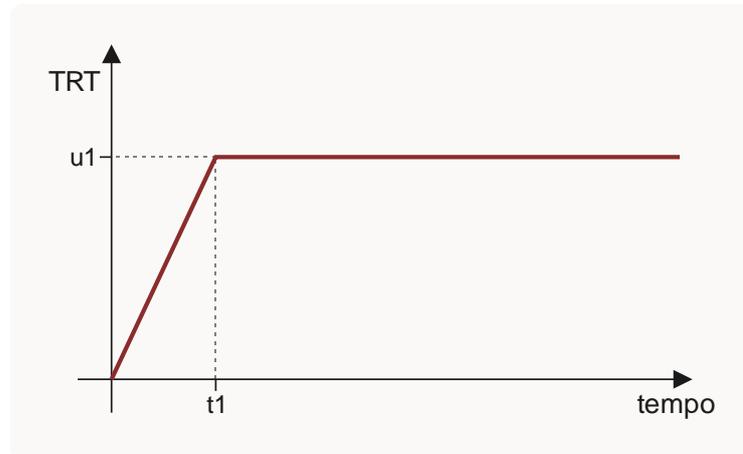


Fonte: Adaptado de Sinder (2007).

Segundo a IEEE C37.06 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2017), os disjuntores podem ter suas curvas de envoltórias de duas formas: envoltórias de dois parâmetros e de quatro parâmetros.

As envoltórias a dois parâmetros, como apresentado na Figura 6, é usada para disjuntores abaixo de 100 kV. Nessa figura, t_1 é o tempo final de subida da reta da envoltória e u_1 é a tensão máxima permitida pela envoltória.

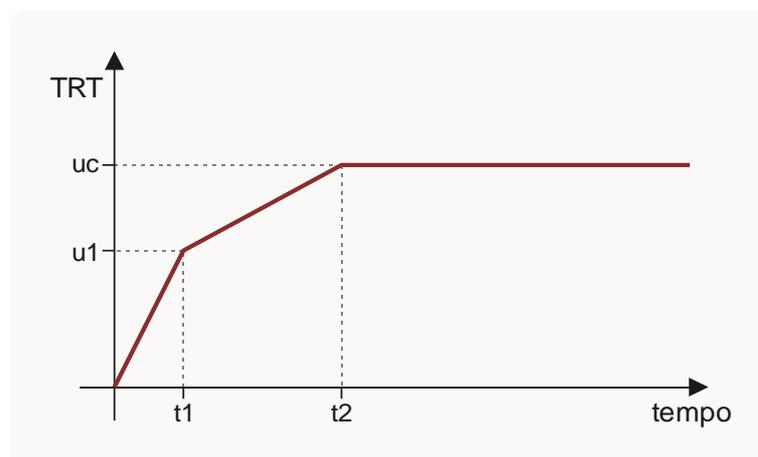
Figura 6 – Envoltória de dois parâmetros



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A envoltória de quatro parâmetros (Figura 7) é usada para disjuntores acima de 100 kV. Ela possui duas inclinações de reta. As variáveis t_1 e u_1 definem o primeiro ponto da reta da envoltória e t_2 e u_c definem o ponto de máxima tensão suportada pelo disjuntor.

Figura 7 – Envoltória de quatro parâmetros



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Além do nível de tensão operacional do disjuntor, outro fator importante para a envoltória é o nível de curto-circuito aplicado no disjuntor. A norma estabelece que as envoltórias terão valores diferentes para cada porcentagem de curto-circuito.

A porcentagem é classificada em 100%, 60%, 30% e 10%, sendo representados na norma por T100, T60, T30 e T10, respectivamente. Para disjuntores acima de 100 kV, as envoltórias de T100 e T60 são de quatro parâmetros, já para T30 e T10 são estabelecidas envoltórias de dois parâmetros.

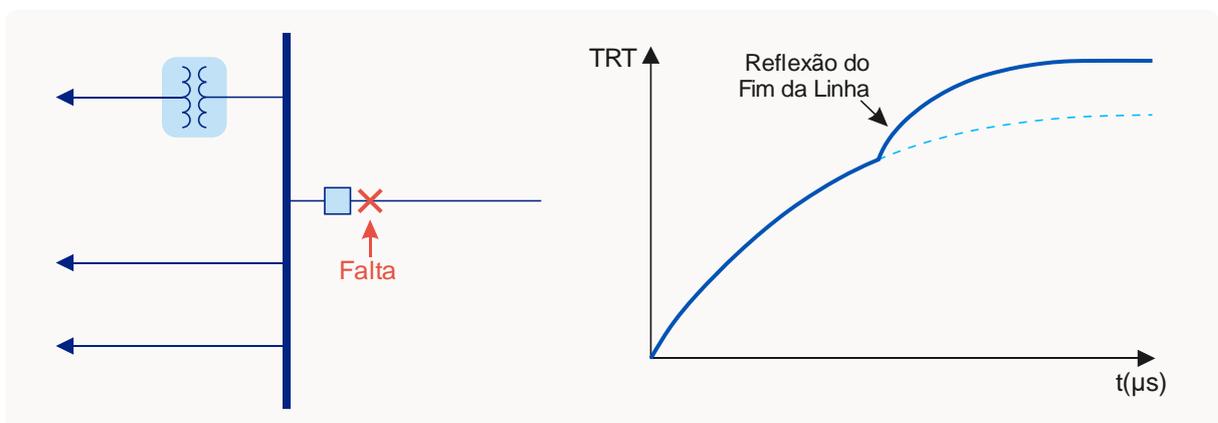
Uma vez conhecido o valor do curto-circuito a ser analisado, a envoltória de valor superior mais próxima deve ser escolhida. Também é possível interpolar os pontos de todos os quatro níveis de envoltória para encontrar os valores de envoltória de um curto específico, como, por exemplo, T85, em que o curto-circuito teria 85% da capacidade de interrupção disjuntor.

2.4 FORMAS DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

Segundo a norma IEEE 37.011 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2019), a característica da TRT de um sistema é frequentemente complexa, sendo necessário o uso de simulação computacional para a sua solução. Porém, em muitos casos, a característica predominante de uma TRT pode ser representada como exponencial, oscilatória ou triangular.

A TRT exponencial geralmente ocorre na interrupção de uma falta trifásica em que exista pelo menos um transformador e uma linha de transmissão do lado sem falta do disjuntor. A Figura 8 mostra a característica exponencial da TRT, em que o fim da linha de transmissão reflete o sinal da TRT.

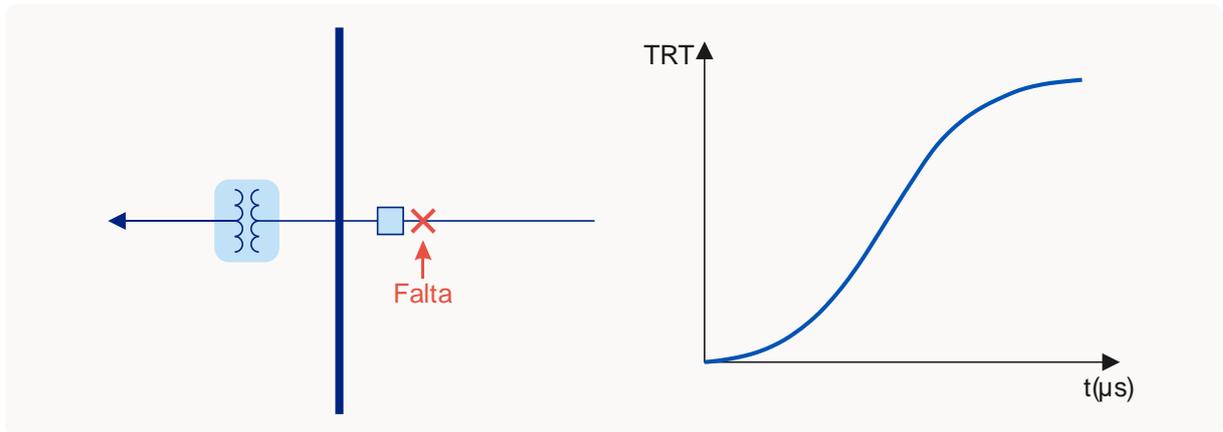
Figura 8 – Tensão de restabelecimento transitória exponencial



Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2019).

A TRT oscilatória (Figura 9) ocorre quando uma falta é limitada por um transformador ou reator série do lado sem falta do disjuntor e a impedância característica da linha de transmissão (Z_0) não está presente para apresentar amortecimento ao fenômeno.

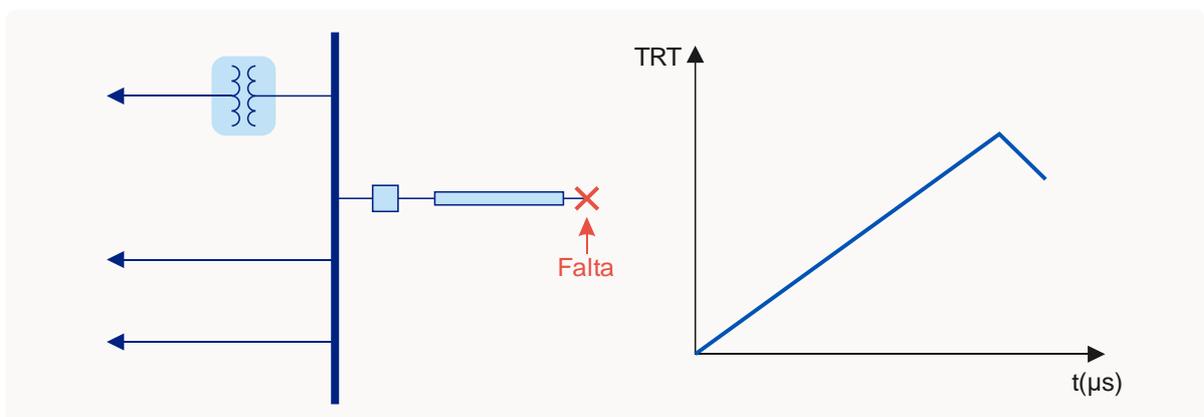
Figura 9 – Tensão de restabelecimento transitória oscilatória



Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2019).

Já a TRT triangular (Figura 10) ocorre em faltas em linhas de transmissão curtas. Nesse caso, a impedância característica da linha de transmissão determina a natureza da forma da TRT. A taxa de crescimento da TRT triangular é geralmente maior se comparada às TRTs exponenciais e oscilatórias. Aqui a superação por TRT tende a ocorrer pelo rápido aumento da TRT, evidenciado por sua alta taxa de crescimento.

Figura 10 – Tensão de restabelecimento transitória triangular



Fonte: Adaptado de Institute of Electrical and Electronics Engineers (2019).

2.5 ARCO ELÉTRICO

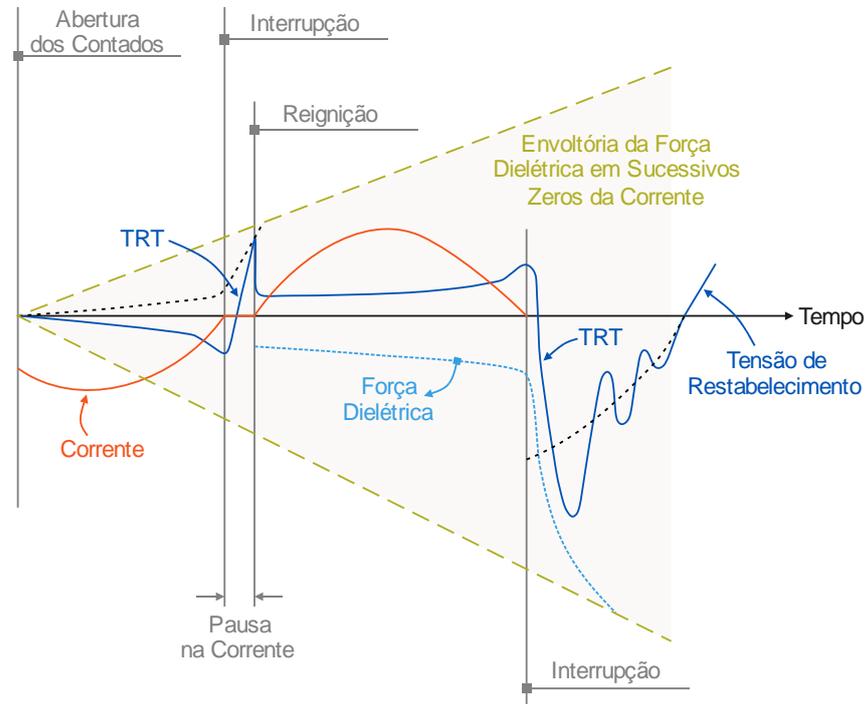
O disjuntor, ao interromper a corrente, apresenta arco elétrico entre os seus polos. Após essa etapa, a corrente é interrompida completamente, e, dependendo das características do sistema, há a ocorrência de um transitório de tensão. Logo, a análise e a simulação da TRT em um disjuntor que possua a representação do arco elétrico são válidas para que seja analisada a sua influência na TRT.

No momento da abertura dos contatos do disjuntor, a corrente ainda flui através do arco elétrico, porém a força dielétrica entre os contatos do disjuntor começa a aumentar. No primeiro ponto de interrupção de corrente, a tensão criada entre os polos, a TRT, aumenta rapidamente devido à energia armazenada nas indutâncias do sistema. Como a força dielétrica ainda está aumentando, mas não chegou ao seu máximo, a TRT consegue ser mais forte e reinicia o arco elétrico, como pode ser visto no ponto de reignição.

Nesse momento, a corrente elétrica irá fluir no semiciclo até chegar novamente em zero. Na passagem por zero, é feita uma nova interrupção da corrente, porém, dessa vez, a força dielétrica é maior que o semiciclo anterior, sendo possível ser interpretada como a envoltória da força dielétrica, que, a cada semiciclo, torna-se maior. A TRT iniciada a partir da nova interrupção da corrente já não é suficientemente forte para vencer a envoltória do dielétrico, não reiniciando o arco elétrico e mantendo permanente a interrupção da corrente.

O modelo de um arco elétrico em um disjuntor, conforme proposto por Bizjak (1974), pode ser obtido por meio de duas equações que utilizam os modelos clássicos de arco de Mayr (1931) e Cassie (1932). A primeira equação, baseada no modelo de Cassie, modela o comportamento do arco quando há passagem de corrente. Já a segunda equação, baseada no modelo de Mayr, modela o arco elétrico quando a corrente está próxima a zero (no período de pausa da corrente, conforme ilustrado anteriormente na Figura 11).

Figura 11 – Arco elétrico a partir da abertura dos contatos do disjuntor



Fonte: Adaptado de Naef, Zimmerman e Beehler (1965).

Em um disjuntor ideal, a corrente é interrompida ao cruzar por zero. O disjuntor no qual o arco elétrico é considerado funciona de forma análoga, também interrompendo a corrente quando esta passa por zero, porém com algumas diferenças. O arco elétrico é um fenômeno em que a corrente deixa de passar por um meio condutor, o contato entre os polos, e começa a passar pelo meio isolante, quando os contatos são separados. O meio isolante, por não ser um bom condutor, possui uma certa resistência à passagem de corrente. A combinação entre a passagem de corrente e a resistência que o arco possui cria uma queda de tensão entre os terminais do disjuntor. Essa tensão, por sua vez, pode influenciar na TRT.

Essa influência ocorre, pois ao se analisar a TRT anterior, leva-se em consideração as condições iniciais do circuito. O disjuntor ideal não possui resistência entre os seus polos, logo, a condição inicial do circuito é a diferença de tensão zero nas capacitâncias próximas. Já o disjuntor não ideal possui uma resistência de arco, o que levará a uma queda de tensão entre seus terminais e, conseqüentemente, a uma condição inicial do sistema diferente de zero, podendo influenciar o comportamento da TRT.

Herman e Ragaller (1978) demonstram que a influência do arco elétrico no cálculo da TRT tende a reduzir a sua crista. Logo, análises que não levam em conta o arco elétrico tendem a ser mais conservadoras, pois simularão um cenário mais grave.

3 CÁLCULOS DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

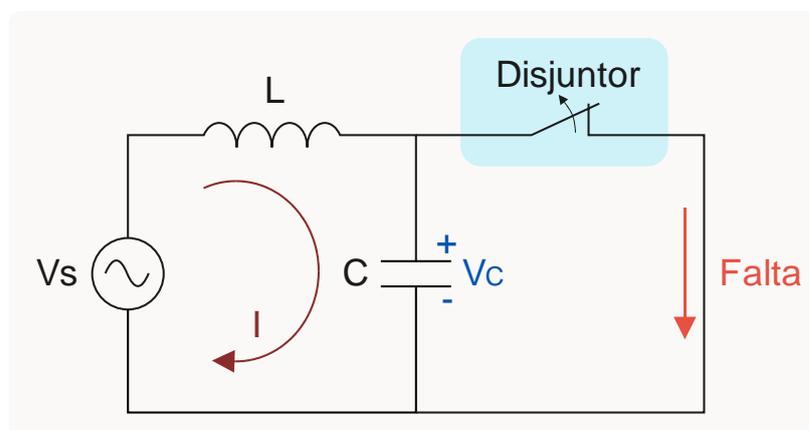
Uma possível abordagem para análise do comportamento de um transitório de alta frequência, como a TRT, é feita por meio da remoção de um curto-circuito e posterior análise de sua resposta no tempo (GREENWOOD, 1991). A seguir, serão demonstradas algumas maneiras de como essa abordagem pode ser realizada.

3.1 EXPRESSÃO ANALÍTICA DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

3.1.1 Circuito de frequência simples

O circuito mais simples para a representação de um transitório é um circuito constituído por um indutor e um capacitor. Essa análise permite que seja conhecido o comportamento do transitório. Par tanto, utiliza-se um circuito LC com um curto-circuito nos terminais do capacitor, como mostrado na Figura 12. Esse circuito pode ser examinado de forma análoga a um sistema de potência que alimenta uma carga, porém com a ocorrência de um curto-circuito a montante da carga, a qual pode ser desprezada.

Figura 12 – Circuito LC



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O circuito, inicialmente, está com o disjuntor fechado, permitindo a passagem de corrente para o ponto de falta. Em um segundo momento, o disjuntor interrompe a corrente de falta, e o circuito torna-se um circuito LC. É importante notar que as condições iniciais do circuito são obtidas durante a falta, e a resolução analítica é realizada após o disjuntor extinguir o arco.

A indutância L representa toda as indutâncias que limitam o curto-circuito na direção do sistema. Já a capacitância C é a capacitância natural do sistema estando adjacente ao disjuntor. Essa capacitância é a capacitância à terra que existe nos equipamentos do sistema, que são, entre outros, isoladores, transformadores de potência e transformadores de medição. Há também a capacitância dos terminais do disjuntor devido ao fato de um de seus terminais estar com o potencial da terra em função da falta. Os valores de resistência não foram usados no exemplo, devido ao fato de aumentarem a dificuldade da solução analítica.

O disjuntor, ao abrir seus contatos, não extingue a corrente instantaneamente. Há a ocorrência de um arco elétrico e a posterior eliminação da corrente. A corrente é eliminada quando passa por zero, seja em um circuito modelado para ter arco ou não. No caso do circuito da Figura 12, o disjuntor comporta-se como uma chave sem perdas e sem arco elétrico, extinguindo o arco quando a corrente passar por zero.

O circuito durante a falta é predominantemente indutivo, o que faz com que a corrente esteja atrasada de 90° em relação à tensão do sistema. Com a abertura do disjuntor, a corrente será extinta quando passar por zero, o que significa que a tensão do sistema está em seu pico.

A tensão V_s é uma fonte de tensão senoidal descrita da seguinte forma:

$$V_s = V_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

Em que V_m é a amplitude da tensão e ω é a frequência angular do sistema.

Com o disjuntor aberto, aplica-se a Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK) na malha percorrida pela corrente I , logo, tem-se a seguinte equação:

$$L \frac{dI}{dt} + V_c = V_m \cos(\omega t) \quad (2)$$

Há duas incógnitas na Equação 2, a corrente I e a tensão sobre o capacitor V_c . Como a corrente I que passa pela malha é a mesma que passa pelo capacitor, é possível fazer a relação entre ambos por meio da Equação 3.

$$I = C \frac{dV_c}{dt} \quad (3)$$

Aplicando a Equação 2 na Equação 1 e retirando os coeficientes do termo de maior derivada, tem-se a Equação 4:

$$\frac{d^2V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = \frac{V_m}{LC} \cos(\omega t) \quad (4)$$

Para resolver a Equação 4, será usada a transformada de Laplace, e a constante LC será representada por $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$. Logo, tem-se a Equação 5:

$$s^2 v_c(s) - sV_c(0) - V_c'(0) + \omega_0^2 v_c(s) = \omega_0^2 V_m \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (5)$$

Isolando o termo $v_c(s)$, obtém-se a Equação 6, a partir da qual a condição inicial de tensão no capacitor pode ser aplicada.

$$v_c(s) = \omega_0^2 V_m \frac{s}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + \omega_0^2)} + V_c(0) \frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{V_c'(0)}{s^2 + \omega_0^2} \quad (6)$$

No momento que o disjuntor abre, a corrente que passa no capacitor é zero. Outra observação possível é que a tensão do capacitor durante a falta é a mesma tensão sobre o disjuntor, que no caso é zero, pois compartilham seus terminais. Assim, tem-se a Equação 7:

$$V_c'(0) = \frac{I(0)}{C} \quad (7)$$

Como a corrente que passa pelo capacitor $I(0)$ é zero:

$$V_c'(0) = 0 \quad (8)$$

Substituindo a Equação 8 na Equação 6, somente o primeiro termo permanecerá, conforme Equação 9.

$$v_c(s) = \omega_0^2 V_m \frac{s}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + \omega_0^2)} \quad (9)$$

Para separar os denominadores da Equação 9 para que ela possa ser resolvida, usa-se a identidade matemática da seguir Equação 10.

$$\frac{s}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + \omega_0^2)} = \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \right) \quad (10)$$

Aplicando a Equação 10 na Equação 9, tem-se:

$$v_c(s) = V_m \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \right) \quad (11)$$

Com os termos dispostos na Equação 11, percebe-se que é possível aplicar a transformada inversa de Laplace. Logo, tem-se:

$$V_c(t) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} V_m \quad (12)$$

A Equação 12 demonstra a tensão no domínio do tempo que aparecerá nos terminais do disjuntor após sua abertura. E, como a frequência natural do circuito sempre é maior que a frequência do sistema, o termo $\omega_0^2/\omega_0^2 - \omega^2 \cong 1$, logo:

$$V_c(t) = V_m \quad (13)$$

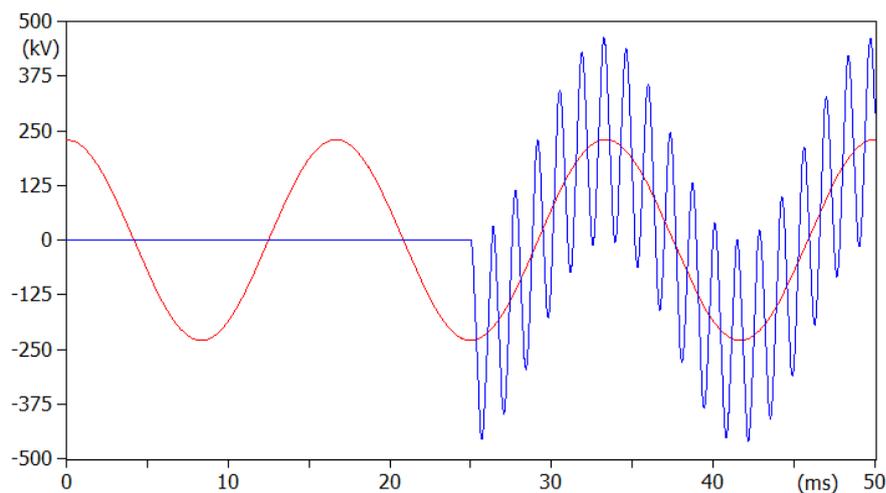
Durante o período de transitório, a variação de ω é menor que ω_0 , logo, nesse período analisado, é possível igualar o termo que possui ω a 1, como pode ser observado na Equação 14.

$$V_c(t) = V_m(1 - \cos(\omega_0 t)) \quad (14)$$

A partir da Equação 14, é possível notar que a frequência natural do circuito será a oscilação transitória do sistema. Como o sistema analisado não possui resistência, ou seja, dispositivos que dissipem a energia do circuito, a equação resultante não terá decaimento da componente de frequência natural, diferentemente do que acontece em sistemas reais devido às resistências de condutores e equipamentos. Se fosse considerado um circuito com uma resistência em série, existiria um termo que faria com que a amplitude da frequência natural decaísse exponencialmente.

O circuito da Figura 12 foi simulado com os seguintes valores: $V_S = 230 \text{ kV}$, $X_l = 15 \Omega$ e $C = 1 \mu\text{F}$. A chave foi aberta em 20 ms, e o resultado pode ser observado na Figura 13. A senoide em vermelho é a tensão da fonte do sistema, que possui a frequência angular do sistema. A segunda forma de onda (em azul), que aparece aproximadamente em 25 ms, é a tensão entre os terminais do disjuntor que foi aberto.

Figura 13 – Resposta do circuito de frequência simples sem amortecimento (sem a consideração de resistor)



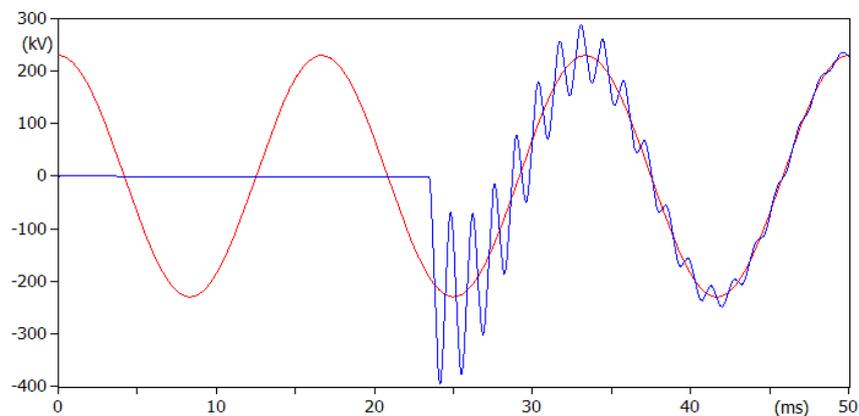
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Na Figura 13, é possível perceber um comportamento condizente com a Equação 14, pois a tensão que surge nos terminais do disjuntor é uma soma de duas frequências, a frequência fundamental e a frequência natural do circuito. Como não

há resistor, a energia fica oscilando entre o capacitor e o indutor. O pico da tensão nos terminais do disjuntor teve quase o dobro de crescimento de amplitude do que o a tensão da fonte.

Para que o sistema fique um pouco mais realista, um resistor de $10\ \Omega$ é inserido em série ao indutor, simulando assim as perdas ôhmicas. O resultado pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Resposta do circuito de frequência simples com amortecimento (com a consideração de resistor)



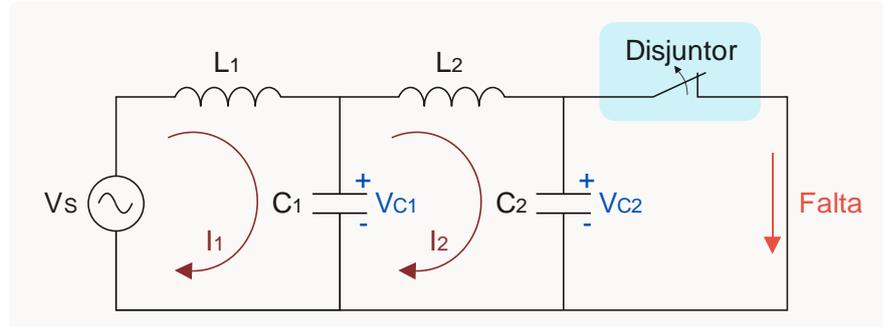
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Após a abertura do disjuntor, percebe-se que a tensão sobre o disjuntor ainda sofre influência da frequência natural, porém decai com o tempo até existir somente a influência da frequência da fonte. A resposta do circuito na Figura 14 é semelhante ao que ocorre em um sistema de potência. Esse transitório é denominado TRT.

3.1.2 Circuito de frequência dupla

Transitórios de frequência dupla são mais comuns que os de frequência simples. Análises de transitórios em sistemas com transformadores, nos quais se deseja analisar o transitório no seu secundário, são melhores representados por circuitos de frequência dupla. Um circuito de frequência dupla é mostrado na Figura 15, em que a indutância $L1$ e a capacitância $C1$ são representações das impedâncias do sistema, e $L2$ e $C2$ são representações das impedâncias do transformador.

Figura 15 – Circuito de frequência dupla



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Primeiramente é possível afirmar que a reatância do capacitor C_1 , quando analisado em 60 Hz, é muito superior às reatâncias dos indutores próximos. Assume-se que o capacitor é um circuito aberto, e calcula-se a sua tensão por meio da queda de tensão nos indutores dispostos em série. Logo, tem-se a Equação 15:

$$V_{c1}(0) = \frac{L_2}{L_1 + L_2} V \quad (15)$$

A LTK é aplicada na malha da corrente I_1 , e a tensão do capacitor C_1 é isolada, obtendo-se assim a Equação 16. Já a tensão no capacitor C_2 é descrita pela Equação 17.

$$V_{c1} = V - L_1 \frac{dI_1}{dt} = V_{c1}(0) + \frac{1}{C} \int (I_1 - I_2) dt \quad (16)$$

$$V_{c2} = \frac{1}{C_2} \int I_2 dt \quad (17)$$

Aplicando a LTK para a malha da corrente I_2 e isolando a tensão do capacitor C_2 , tem-se a Equação 18:

$$V_{c2} = V - L_1 \frac{dI_1}{dt} - L_2 \frac{dI_2}{dt} \quad (18)$$

Aplicando a transformada de Laplace na Equação 16, obtém-se a Equação 19, na qual pode-se isolar os termos que são função de s resultando na Equação 20.

$$\frac{V}{s} - L_1 s i_1(s) - L_1 I_1(0) = \frac{V_{c1}(0)}{s} + \frac{1}{C_1 s} (i_1(s) - i_2(s)) \quad (19)$$

$$-i_1(s) \left(L_1 s + \frac{1}{C_1 s} \right) + \frac{i_2(s)}{C_1 s} = \frac{V_{c1}(0)}{s} - L_1 I_1(0) - \frac{V}{s} \quad (20)$$

Aplicando também a transformada de Laplace nas Equações 17 e 18, obtém-se as Equações 21 e 22, respectivamente.

$$V_{c2}(s) = \frac{i_2(s)}{s C_2} \quad (21)$$

$$V_{c2} + \frac{V}{s} - L_1 s i_2(s) + L_1 I_1(0) - L_2 s i_2(s) + L_2 I_2(0) \quad (22)$$

No momento da falta, a corrente que passa pelos capacitores é zero. Logo, as correntes I_1 e I_2 são iguais a zero, como condição inicial. Aplicando a Equação 21 na Equação 22 e inserindo os valores das condições iniciais, a Equação 23 é obtida.

$$i_1(s) = \frac{V}{L_1 s^2} - \left(\frac{L_2 C_2 s^2 + 1}{L_1 s} \right) V_{c2}(s) \quad (23)$$

Substituindo as Equações 23 e 21 na Equação 20, tem-se a Equação 24 que ao ser multiplicada pelo termo $s^2/L_2 C_2$, pode ser rearranjada conforme Equação 25.

$$\left[\left(\frac{L_2 C_2 s^2 + 1}{L_1 s} \right) v_{c2}(s) - \frac{V}{L_1 s} \right] \left(L_1 s + \frac{1}{C_1 s} \right) + \frac{C_2}{C_1} v_{c2}(s) = \frac{V_{c1}(0) - V}{s} \quad (24)$$

$$\left[s^4 + s^2 \left(\frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2} + \frac{1}{L_2 C_1} \right) + \frac{1}{L_1 C_1 L_2 C_2 s} \right] v_{c2}(0) = \frac{s V_{c1}(0)}{L_2 C_2} + \frac{V}{L_1 C_1 L_2 C_2 s} \quad (25)$$

Aplicando as condições iniciais do capacitor C1 na Equação 25, tem-se:

$$\begin{aligned} & \left[s^4 + s^2 \left(\frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2} + \frac{1}{L_2 C_1} \right) + \frac{1}{L_1 C_1 L_2 C_2 s} \right] v_{c2}(s) \\ & = V \left(\frac{s}{(L_1 + L_2) C_2} + \frac{1}{L_1 C_1 L_2 C_2 s} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

Como o lado esquerdo da Equação 26 é quadrática, ela pode ser reescrita como:

$$(s^2 + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2)v_{c2}(s) = AV \left(\frac{1}{s} + Bs \right) \quad (27)$$

Isolando $v_{c2}(s)$, tem-se:

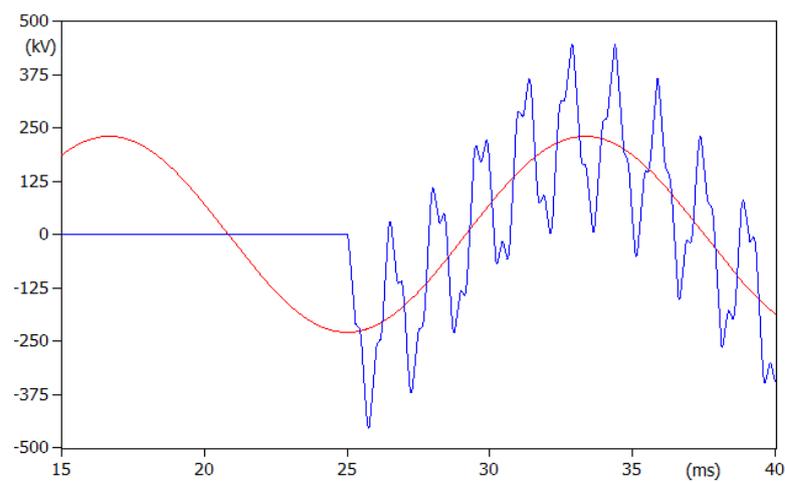
$$v_{c2}(s) = AV \left(\frac{1}{s(s^2 + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2)} + \frac{Bs}{(s^2 + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2)} \right) \quad (28)$$

Em que os termos A , B , ω_1 e ω_2 são constantes dependentes de L_1, L_2, C_1 e C_2 .

Por meio de frações parciais, é possível fazer a transformada inversa de Laplace, cuja solução é demonstrada pela Equação 29, que representa também a tensão sobre os terminais do disjuntor. É possível perceber que seu grau de dificuldade aumentou significativamente em relação ao circuito de frequência simples.

$$V_2(t) = AV \left[\frac{1}{\omega_1^2 \omega_2^2} + \left(\frac{(1 - \omega_1^2 B)}{\omega_1^2 (\omega_1^2 - \omega_2^2)} \right) \cos(\omega_1 t) - \left(\frac{(1 - \omega_1^2 B)}{\omega_2^2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \right) \cos(\omega_2 t) \right] \quad (29)$$

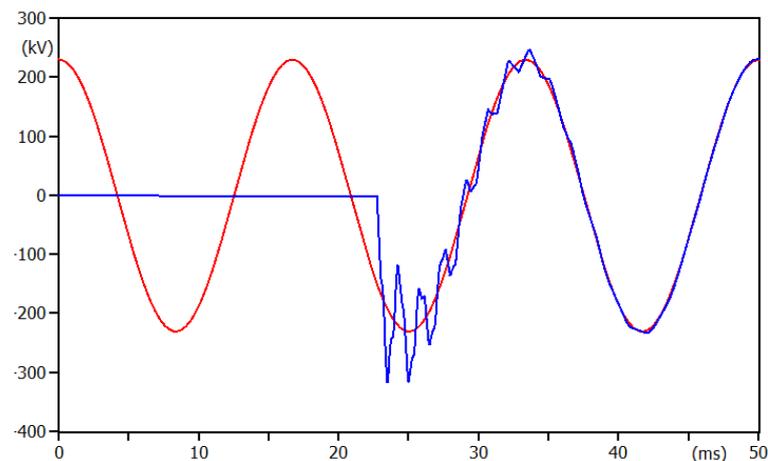
Figura 16 – Resposta do circuito de frequência dupla sem amortecimento



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Na Figura 16, a tensão de restabelecimento não decai, devido aos circuitos ressonantes. Quando resistências são inseridas ao sistema, as amplitudes dos termos vinculados às frequências naturais decaem, caracterizando assim uma tensão de restabelecimento transitória, conforme apresentado na Figura 17. Percebe-se que o transitório da tensão sobre o disjuntor decai e que a sua oscilação possui mais de uma frequência, caracterizando uma TRT.

Figura 17 – Resposta do circuito de frequência dupla com amortecimento



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Esse segundo exemplo, considerando um circuito de frequência dupla, evidencia o aumento na complexidade para a resolução do circuito de forma analítica. Se for aumentada a complexidade do circuito a ser avaliado, a resposta em forma analítica se torna inviável. Uma solução para esse problema é a utilização de programas computacionais que resolvam os circuitos iterativamente.

3.2 MÉTODO IEEE C37.011-2019 e simulações via ATPDraw

O método do IEEE C37.011 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2019) para cálculo da TRT é baseado no domínio do tempo, sendo uma forma de simplificar as análises de TRT de forma a atender à demanda por resultados mais rápidos mediante equações simples.

Esse método utiliza a injeção de corrente e o equivalente das impedâncias vistas pelo disjuntor até o momento da primeira reflexão da onda de tensão.

O método proposto pela norma IEEE C37.011 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2019) apresenta uma solução analítica, na qual é possível, por meio da redução do sistema, encontrar impedâncias equivalentes para o uso em suas equações.

Segundo Sinder (2007), o uso do método IEEE para cálculo de TRT é aconselhável em sistemas de distribuição ou radiais, uma vez que as linhas de transmissão estão conectadas a cargas. Em sistemas de potência nos quais as linhas de transmissão estão interligando subestações, o método apresentou elevados níveis de TRT que não condizem com os resultados das simulações no domínio do tempo.

As simulações do domínio do tempo, em especial o programa ATP-EMTP em conjunto com ATPDraw, são as mais utilizadas para os estudos de transitórios, como a TRT.

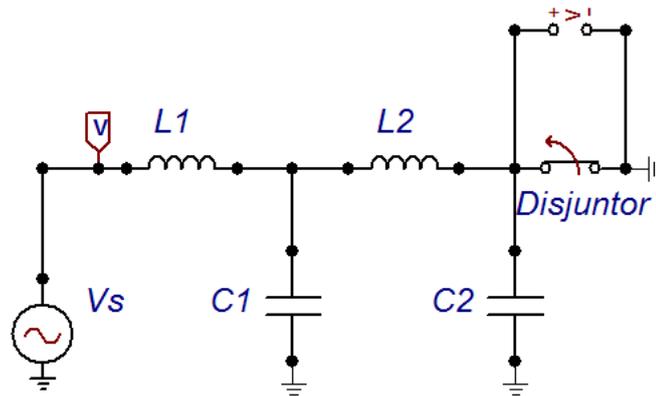
Conforme demonstrado na seção 3.1, a solução analítica de TRT pode tornar-se inviável com o aumento da complexidade do sistema envolvido. O ATP-EMTP é um programa que simula circuitos elétricos no domínio do tempo, sendo amplamente utilizado para estudos de fenômenos elétricos transitórios em sistemas de potência.

A modelagem dos sistemas é de fácil entendimento, porém o tempo necessário para modelagem e simulação é um aspecto que pesa negativamente.

Para facilitar o uso do ATP-EMTP, é utilizado um pré-processador gráfico que transforma um diagrama de circuito no cartão necessário para que o ATP-EMTP

execute seus cálculos. O pré-processador gráfico chama-se ATPDraw e será utilizado neste trabalho como ferramenta para a solução dos circuitos elétricos que virão a seguir. A Figura 18 representa o exemplo do circuito da Figura 15.

Figura 18 – Circuito de frequência dupla modelado no ATPDraw



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Por trabalhar no domínio do tempo, o ATP realiza cálculos para cada iteração de tempo. O tamanho dessa iteração de tempo é definido no programa para que a simulação possa representar as frequências que devem ser analisadas. Ou seja, quanto menor o passo de tempo, maior a frequência que pode ser analisada. No caso das simulações feitas a seguir, o passo de tempo (Δt) escolhido foi de 10^{-8} segundos, valor que permite que as TRTs possam ser observadas na simulação.

Uma forma de contornar o alto tempo utilizado em simulações no domínio do tempo é abordar o estudo de TRT com metodologias no domínio da frequência. A transformada de Fourier é uma das ferramentas que possibilita a utilização do método.

4 METODOLOGIA

4.1 MÉTODO FFT

O método proposto por Sinder (2007) será usado para os estudos de TRT deste trabalho. O método foi batizado de método FFT e será descrito a seguir.

O método é organizado nas seguintes etapas:

1. Obtenção de $Z(\omega)$;
2. Obtenção do $I_{cc}(t)$;
3. Conversão do sinal de $I_{cc}(t)$ em um semisseno;
4. Cálculo da $I_{cc}(\omega) = \text{FFT}(I_{cc}(t))$;
5. Convolução dos sinais: $\text{TRT}(\omega) = Z(\omega) * I_{cc}(\omega)$;
6. Cálculo da $\text{TRT}(t) = \text{IFFT}(\text{TRT}(\omega))$.

4.1.1 Obtenção de $Z(\omega)$

A impedância no domínio da frequência pode ser obtida por dois programas distintos. O primeiro é o ATPDraw, no qual é possível aplicar a técnica para encontrar a impedância no domínio da frequência, no entanto, requer tempo de simulação e alguns ajustes nos circuitos. O segundo, HarmZs, é um programa destinado a estudos de harmônicas. O HarmZs é um programa desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) e é capaz de calcular rapidamente impedância no domínio da frequência.

Considera-se, inicialmente, o sistema teste apresentado na Tabela 1, cuja topologia é ilustrada na Figura 19.

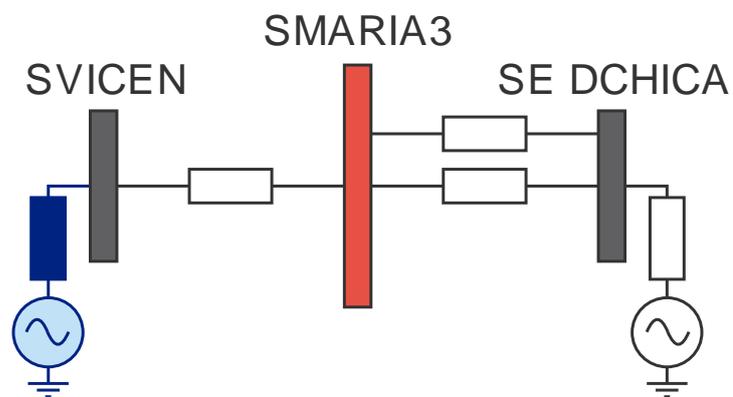
Tabela 1 – Sistema teste

Tipo de equipamento	De	Para	Resistência (Ohm)	Reatância (Ohm)
Gerador	Usina D. Francisca	-	1,666	15,622428
Gerador	São Vicente	-	14,97	103,8158
LT	Usina D. Francisca	Santa Maria	5,9248	33,0625
LT	Usina D. Francisca	Santa Maria	6,17872	31,40144
LT	São Vicente	Santa Maria	7,3002	40,5214

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A TRT que se deseja analisar é em uma das linhas de transmissão entre Santa Maria (barra SMARIA3) e a Usina de Dona Francisca (barra SE DCHICA) para uma falta trifásica próxima ao início da linha de transmissão em Santa Maria. No domínio da frequência, a falta no terminal de linha de transmissão é representada com a retirada da linha de transmissão em falta e a análise de sua tensão e corrente no ponto da falta, no caso, a subestação de Santa Maria.

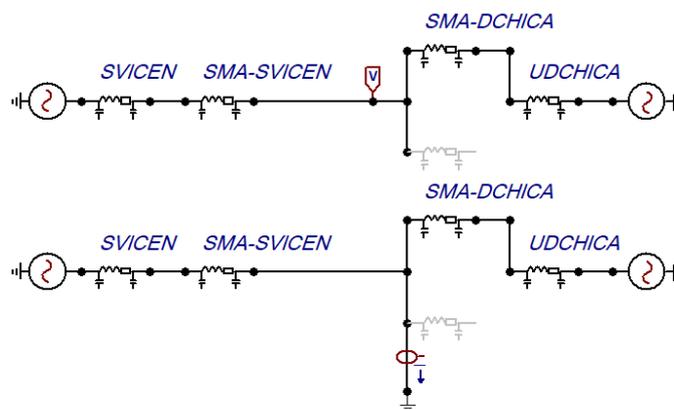
Figura 19 – Sistema teste.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A análise no domínio da frequência com o programa ATPDraw requer que o sistema seja modelado e duplicado, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Sistema teste para a obtenção da impedância no domínio da frequência



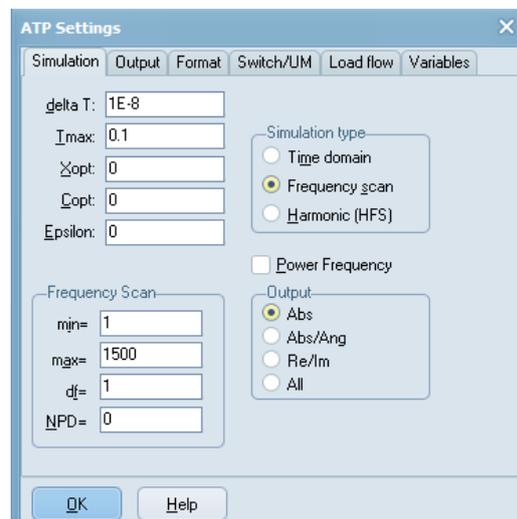
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O sistema foi duplicado para que sejam obtidos os valores de tensão e corrente por meio da variação da frequência. As impedâncias presentes na Tabela 1 foram inseridas na simulação. A tensão na fonte é de 230 kV entre linhas, porém, para o cálculo de $Z(\omega)$, o valor de tensão das fontes do sistema é irrelevante; o importante é que as fontes estejam conectas corretamente ao sistema.

Nesta técnica, o ATPDraw aplica uma corrente de amplitude constante e varia a frequência do sinal, que é lido pelas duas *probes* inseridas no local da falta.

Para a simulação, é necessário selecionar a opção *Frequency Scan* do *Simulation type*, conforme demonstrado na Figura 21.

Figura 21 – Seleção de parâmetros no software ATPDraw



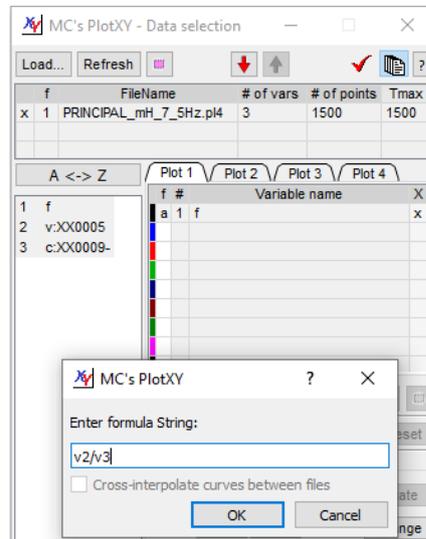
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A opção de parâmetros do *Frequency Scan* ficará disponível para edição, podendo ser configurada a frequência mínima e máxima e o passo de integração da frequência. No exemplo, foi escolhido: $min = 1$, $max = 1500$, $df = 1$; logo, a simulação será executada de 1 Hz até 1.500 Hz com o passo de 1 Hz por iteração. A escolha de saída (*output*) foi o módulo dos sinais lidos. Além do módulo, é possível obter o ângulo, a parte real e a parte imaginária do sinal.

Uma vez simulado o sistema, deve-se abrir o PlotXY presente no ATPDraw. O sinal de impedância não estará presente diretamente na ferramenta de *plot*, sendo necessária a união dos sinais de tensão e corrente pela equação $Z = V/I$. A Figura 22 apresenta a ferramenta PlotXY. Clicando no quadrado branco logo abaixo da letra "a",

consta a opção de inserir uma fórmula. Então, divide-se o sinal de tensão pelo de corrente, no caso, v_2 e v_3 , respectivamente.

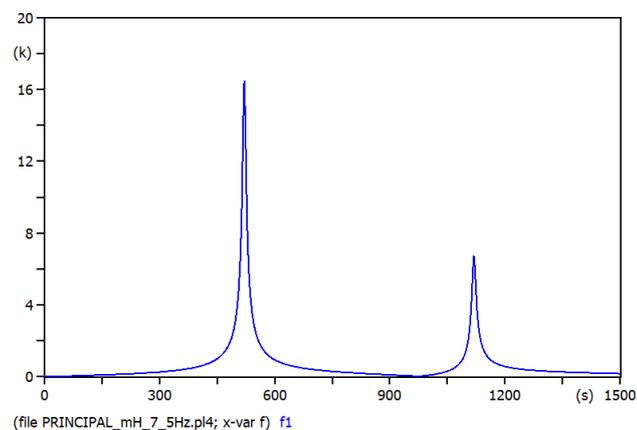
Figura 22 – Representação da PlotXY do *software* ATP



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Clicando em “OK” e posteriormente em “Plot”, será possível ver o sinal da impedância do sistema no domínio da frequência. A Figura 23 apresenta o módulo do sinal de $Z(\omega)$.

Figura 23 – Gráfico resultante da impedância do sistema no domínio da frequência



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O HarmZs apresenta uma maneira mais eficiente de encontrar $Z(\omega)$. Para isso, é necessário gerar um arquivo (.hzs) que contém os parâmetros do sistema elétrico. No Apêndice A, encontra-se o sistema teste a ser carregado no HarmZs.

Após abrir o sistema no programa, uma janela contendo a mensagem “rede montada” é apresentada. Clicando na aba “Cálculos” e depois em “Resposta em Frequência”, a janela chamada “Parâmetros para resposta em frequência” será aberta. Nesta janela, os parâmetros do cálculo em frequência podem ser configurados, como mostra a Figura 24.

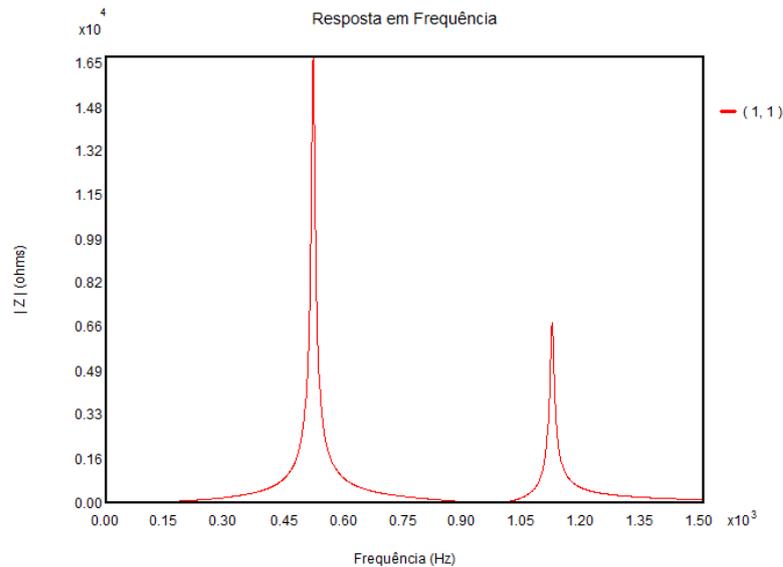
Figura 24 – Configuração no *software* HarmZs dos parâmetros para resposta em frequência

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os parâmetros inseridos no programa são os mesmos aplicados ao ATPDraw. Variando a frequência varia de 1 Hz até 1.500 Hz com o passo de 1 Hz por iteração. Clicando em “Novo traçado”, o programa irá apresentar o gráfico do resultado, que consta na Figura 25. O sinal apresentado na figura é idêntico ao obtido pelo ATPDraw. O que difere as duas simulações é que, no ATPDraw, a simulação dura próximo de 30 segundos, e, no HarmZs, a simulação é de milissegundos. É possível escolher o tipo de curva que será apresentado pelo HarmZs. Para fins de simulação no MATLAB

que serão demonstradas posteriormente, foi escolhido o tipo de curva $Re(Z) \times Im(Z)$, sendo feita a exportação do sinal em *.m* por meio da aba “Opções” e posteriormente “Exportar -> Matlab”.

Figura 25 – Gráfico resultante da aplicação dos dados no *software* HarmZs



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O mesmo resultado de impedância é encontrado nos dois *softwares*. Porém, optou-se pelo uso do HarmZs devido a sua objetividade de inserção do sistema e configuração de parâmetros, levando menos tempo para se obter o resultado esperado.

4.1.2 Obtenção de $I_{cc}(t)$

A corrente de curto-circuito no domínio do tempo pode ser obtida pela simulação do sistema da

Figura 20 – Sistema teste para a obtenção da impedância no domínio da frequência no domínio do tempo por meio do próprio ATPDraw. A leitura da *probe* de corrente irá apresentar a senoide da corrente de curto-circuito. Para o sistema teste, a corrente de pico é 5107A.

4.1.3 Método FFT no MATLAB

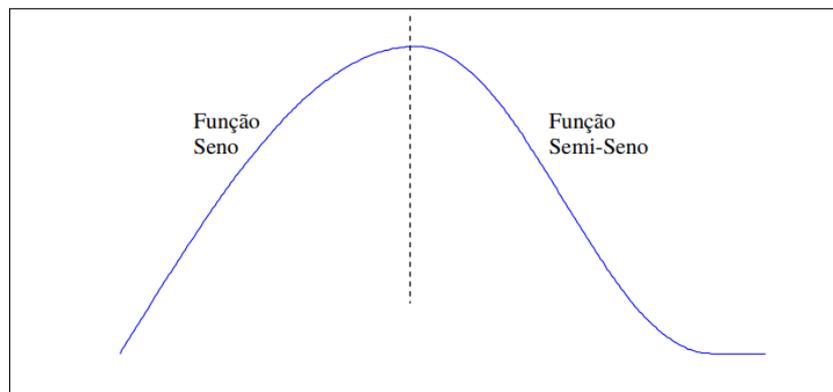
Os itens 3, 4, 5 e 6 do Método FFT foram implementados em um *script* do MATLAB, e serão apresentadas em conjunto a seguir.

Em termos da conversão sinal de $I_{cc}(t)$ em um semisseno, Sinder (2007) propõe a seguinte equação:

$$semisen(t) = \frac{I_{cc}}{2} + \frac{I_{cc}}{2} \left(\text{sen} \omega t - \frac{T}{4} \right) \quad (31)$$

O semisseno é usado para que, no momento da aplicação da FFT, o sinal possua mais de uma frequência além da fundamental, como seria no caso da FFT de uma senoide pura. A Figura 26 apresenta o sinal no domínio do tempo de um semisseno qualquer.

Figura 26 – Função semisseno



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Uma vez obtido semisseno de $I_{cc}(t)$, executa-se a FFT do sinal, resultando em $I_{cc}(\omega)$, que é o sinal da corrente de curto-circuito no domínio da frequência.

A convolução dos sinais $Z(\omega)$ e $I_{cc}(\omega)$ é então executada, resultando em $TRT(\omega)$. Para a convolução ser possível, é necessário que os vetores possuam os mesmos tamanhos e janela de amostragem igual, tendo as mesmas frequências em cada ponto do vetor.

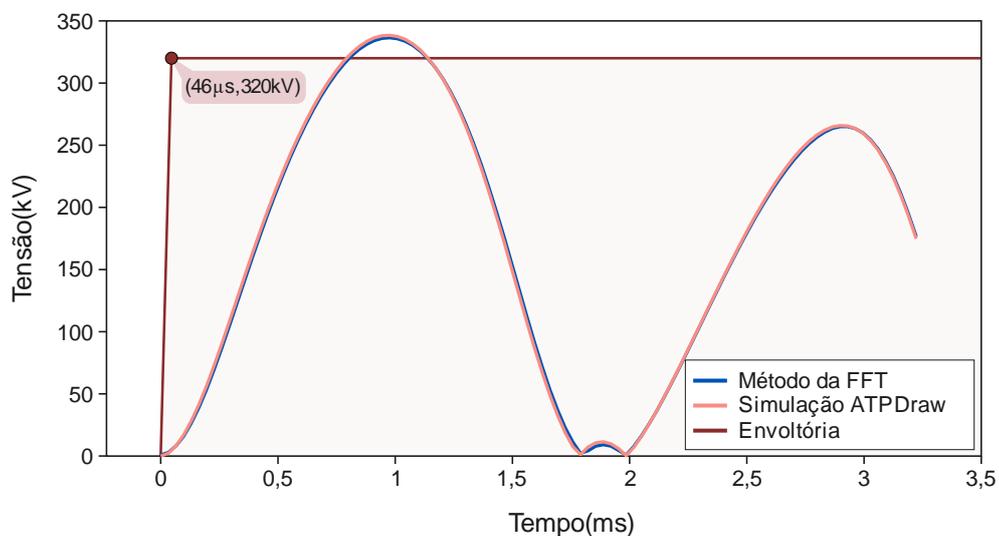
Para que a convolução de $Z(\omega)$ e $I_{cc}(\omega)$ fosse possível, os seguintes parâmetros foram utilizados:

- frequência mínima de $Z(\omega) = 0$ Hz;
- frequência máxima de $Z(\omega) = 15.360$ Hz;
- passo de iteração = 75 Hz;
- frequência de amostragem de $I_{cc}(\omega) = 512$ amostras por ciclo.

Com o vetor de $TRT(\omega)$, executa-se a sua IFFT, de modo a se obter o sinal de TRT no domínio do tempo.

O resultado o método pode ser visto na Figura 27. Em laranja, consta o sinal de simulação do ATPDraw; em azul, o sinal do método da FFT. O cálculo da TRT no domínio da frequência mostrou-se confiável para recriar o mesmo sinal que é simulado em uma ferramenta consolidada.

Figura 27 – Simulação x Método FFT: sistema teste



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

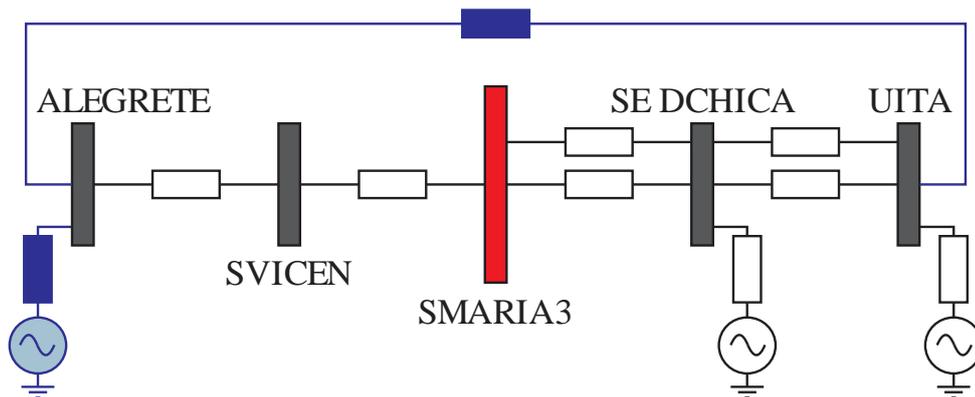
É possível perceber que a TRT desta simulação ultrapassa os limites da envoltória. Nesse caso, o disjuntor pode ser considerado superado. Vale ressaltar que o sistema testado possui somente uma linha de transmissão ou uma barra de fronteira. As simulações mostradas a seguir utilizam o mesmo sistema, porém com mais barras e componentes.

4.2.1 Sistema com duas barras de fronteira

O sistema com duas barras de fronteira pode ser visto na Figura 29. Essa denominação é dada pois, a partir da subestação de Santa Maria 3, o sistema é modelado com as linhas e subestações reais, numa distância de duas subestações ou barras.

Além desse ponto, o sistema utiliza equivalentes de linhas de transmissão e geradores para que a simulação de curto-circuito seja fiel à realidade. Os componentes equivalentes estão na cor azul, no intuito de os destacar os componentes reais do sistema que estão em branco.

Figura 29 – Sistema com duas barras de fronteira



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A Tabela 2 apresenta os dados do sistema com duas barras de fronteira. A linha de transmissão (LT) entre Itaúba (UITA) e Alegrete (ALEGRETE) é uma linha equivalente que representa a simplificação de uma ou mais linhas de transmissão intermediárias às subestações retidas para estudo. Usando o mesmo parâmetro do sistema teste, foi simulado o curto-circuito em uma das linhas entre Santa Maria e Dona Francisca. Como a subestação de estudo é Santa Maria 3, foi feita uma falta simétrica no início da linha de transmissão.

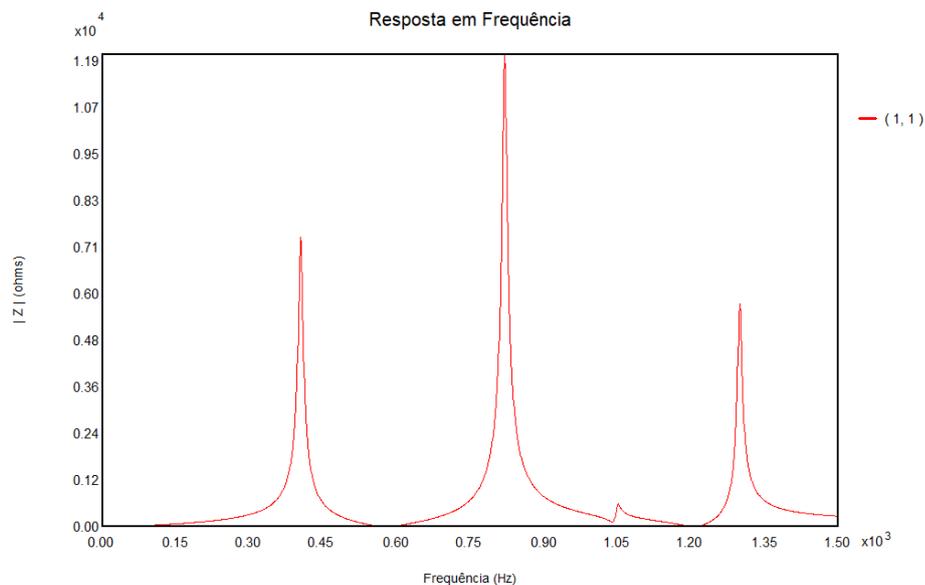
Tabela 2 – Equivalentes e equipamentos do sistema com duas barras de fronteira

Tipo de equipamento	De	Para	Resistência (Ohm)	Reatância (Ohm)	Capacitância (μF)
Gerador	Usina D. Francisca	-	0,1058	109,3972	
Gerador	Usina Itaúba	-	0,212	12,3917	
Gerador equiv	Alegrete 2	-	6.789	52,0855	
LT equiv	Usina Itaúba	Alegrete 2	129.907	0,4170	
LT	Santa Maria 3	Usina D. Francisca	5,925	33,063	0,649
LT	Santa Maria 3	Usina D. Francisca	6,179	31,401	0,648
LT	Santa Maria 3	São Vicente	7,893	43,463	0,705

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Para representação do sistema no domínio da frequência, a linha de transmissão sob falta foi retirada da simulação e calculada a impedância $Z(\omega)$ no ponto de falta, no caso, a subestação de Santa Maria 3. A Figura 30 apresenta a resposta em frequência da impedância do sistema. Cabe pontuar que os picos de impedância em diferentes frequências evidenciam o comportamento transitório do sistema em momentos de abrupta mudança.

Figura 30 – Resposta em frequência do sistema com duas barras de fronteira



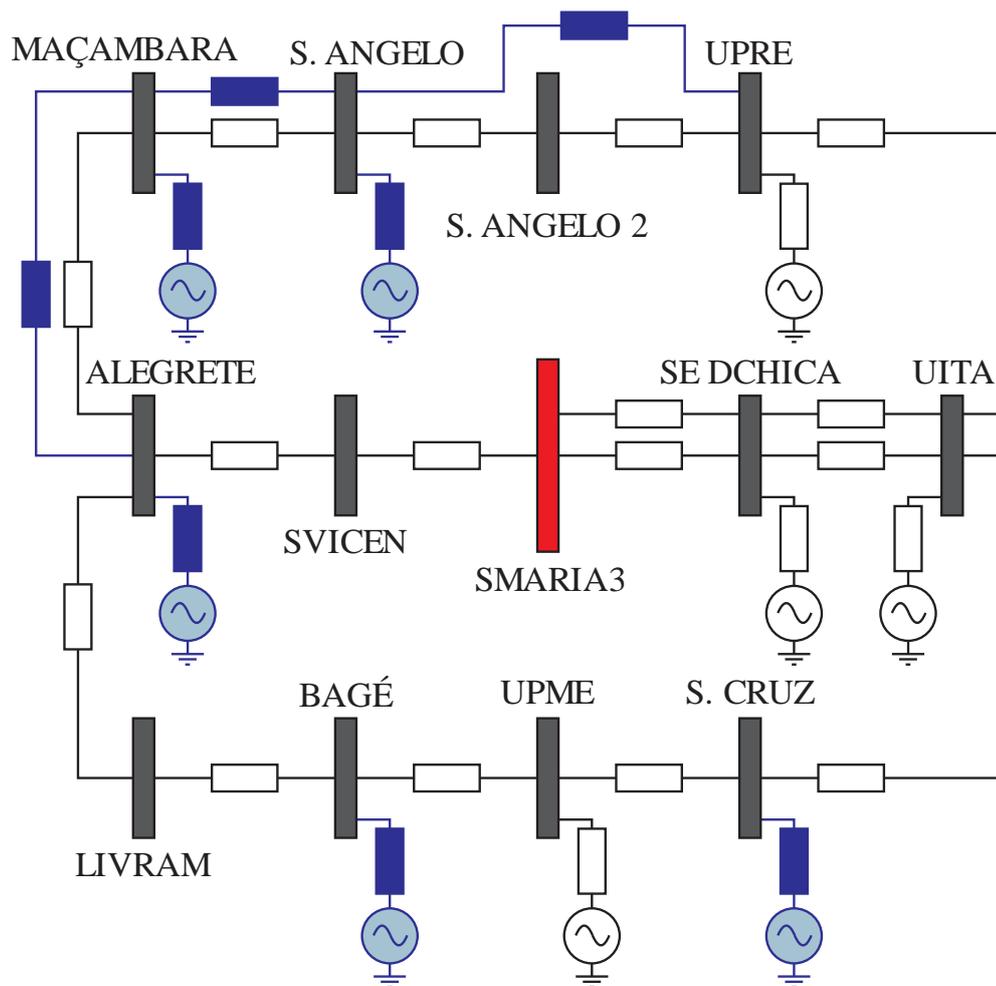
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

4.2.2 Sistema malhado

O sistema malhado é apresentado na Figura 31. Em comparação com os sistemas anteriores, a complexidade deste sistema aumentou consideravelmente. Para a modelagem em programas como o ATP, o tamanho do sistema começa a tornar-se um problema, devido ao aumento de parâmetros a serem configurados.

Em programas como o HarmZs, o aumento do sistema não é um problema, apenas são adicionadas mais linhas de comando no cartão do programa. O Apêndice A apresenta as três topologias aqui analisadas, e, com o aumento de barras do sistema, os cartões do programa ainda estão legíveis.

Figura 31 – Sistema malhado



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os dados do sistema malhado. A Tabela 3 apresenta os equivalentes gerados para que os níveis de curto-circuito estejam certos.

Tabela 3 – Equivalentes do sistema malhado

Tipo de equivalente	De	Para	Resistência (Ohm)	Reatância (Ohm)
Gerador	Usina D. Francisca	-	0,1058	109,3972
Gerador	Usina Itaúba	-	1,0850	22,9731
Gerador	Usina Passo Real	-	3,3480	27,6644
Gerador	Usina P. Médici	-	0,2798	14,1029
Gerador	Santa Cruz 1	-	13,8290	90,4217
Gerador	Alegrete 2	-	14,0780	268,6473
Gerador	Bagé	-	7353	15737,5
Gerador	Santo Ângelo 1	-	1,2780	16,9576
Gerador	Maçambará	-	41,9	560,1581
Linha	Santa Cruz 1	Usina P. Médici	20,5480	107,5401
Linha	Alegrete 2	Maçambará	11,0740	75,9113
Linha	Maçambará	Santo Ângelo 1	26,06	131,6733
Linha	Santo Ângelo 1	Usina Passo Real	136,31	492,08638
Linha	Santo Ângelo 2	Usina Passo Real	15,80	74,1867

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 4 – Linhas de transmissão

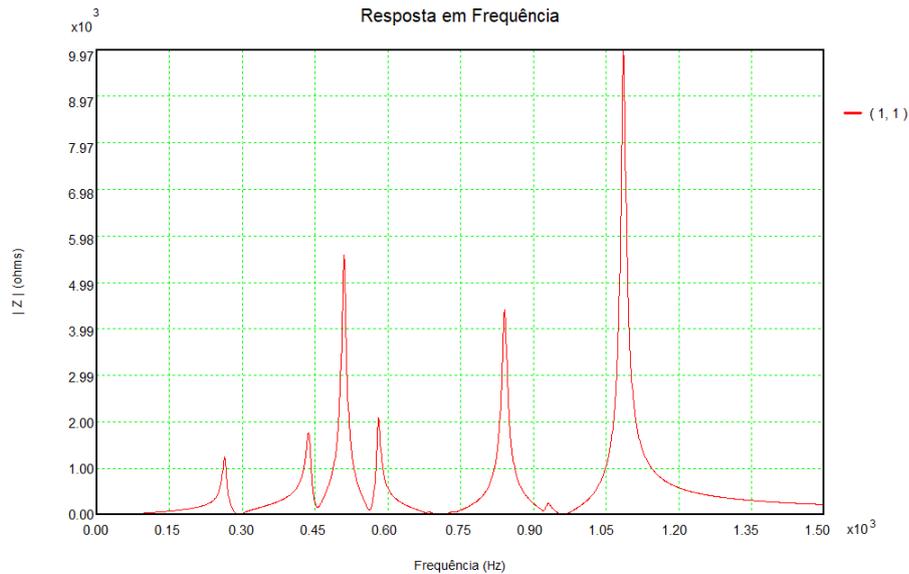
De	Para	Resistência (Ohm)	Reatância (Ohm)	Capacitância (μ F)
Santa Maria 3	Usina D. Francisca	5,925	33,063	0,649
Santa Maria 3	Usina D. Francisca	6,179	31,401	0,648
Santa Maria 3	São Vicente	7,893	43,463	0,705
Usina D. Francisca	Usina Itaúba	2,084	11,834	0,199
Usina D. Francisca	Usina Itaúba	2,084	11,659	0,199
São Vicente	Alegrete 2	8,321	49,768	0,883
Alegrete 2	Livramento	12,961	64,697	1,099
Bagé	Usina P. Médici	4,602	25,445	0,441
Livramento	Bagé	15,288	76,388	1,279
Santa Cruz 1	Usina Itaúba	11,691	63,903	1,106
Alegrete	Maçambará	8,369	41,733	0,710
Maçambará	Santo Ângelo 1	11,955	97,124	1,800
Santo Ângelo 1	Santo Ângelo 2	0,265	1,957	1,870
Usina Itaúba	Usina Passo Real	2,751	15,182	0,262

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Além do módulo de $Z(\omega)$, será apresentada a impedância do sistema no plano Real x Imaginário. A Figura 32 apresenta mais pontos dependentes da frequência que nos exemplos anteriores.

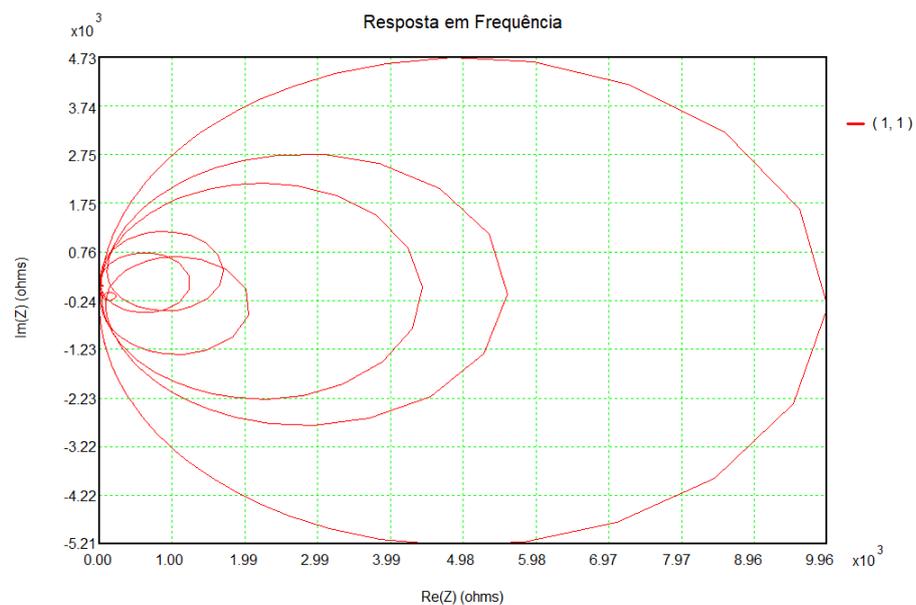
A Figura 33 traz a representação do sistema malhado no domínio da frequência, em que cada ponto de ligação entre duas retas representa uma frequência. Esse plano é importante, pois é com os dados exportados a partir dele que o método FFT opera.

Figura 32 – Módulo de $Z(\omega)$ do sistema malhado



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 33 – Resposta em frequência no plano $Re \times Im$

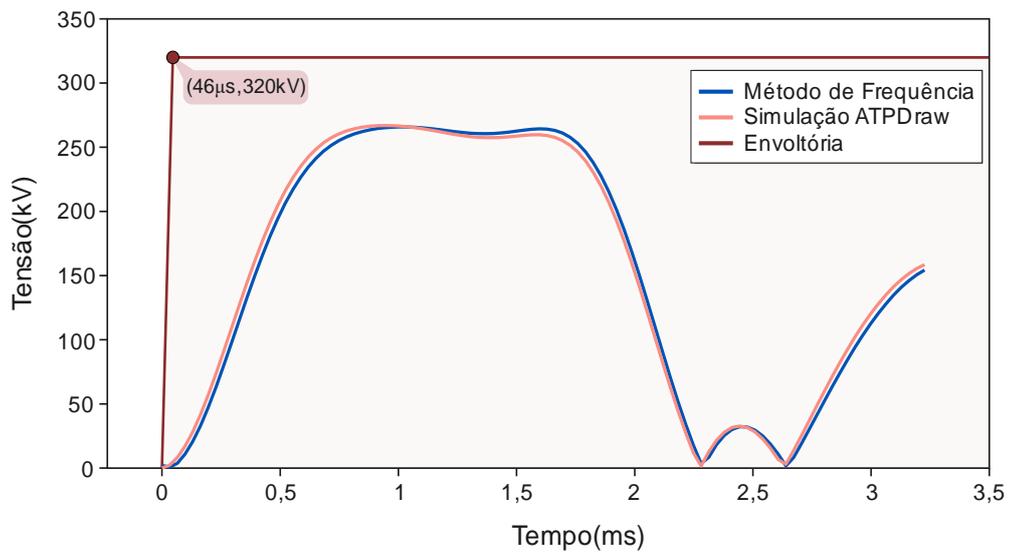


Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

5 RESULTADOS

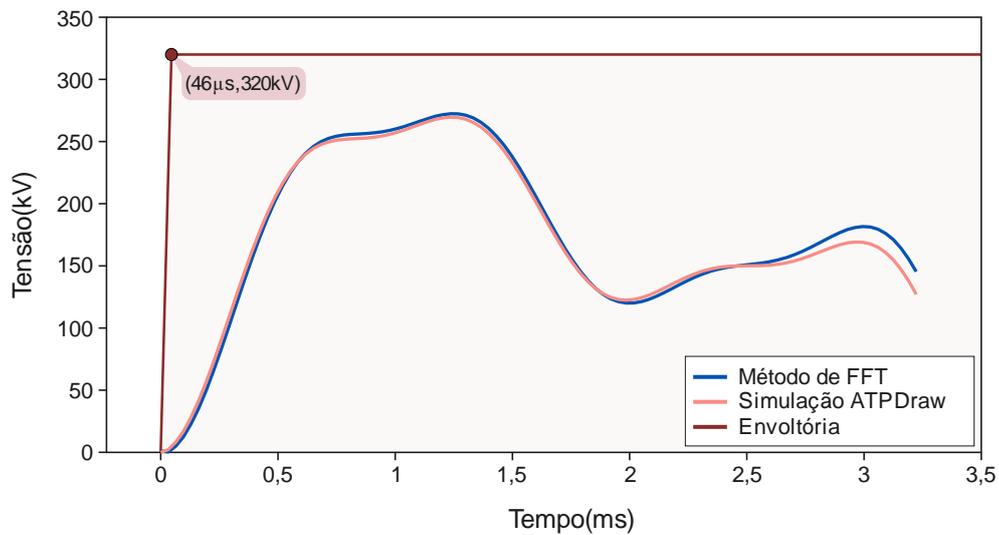
As Figuras 34 e 35 apresentam a comparação entre o método FFT e a simulação tradicional de tensão de restabelecimento transitória (TRT) no domínio do tempo.

Figura 34 – Método FFT x Simulação ATPDraw: sistema com duas barras de fronteira



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 35 – Método FFT x Simulação ATPDraw: sistema malhado



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A Figura 34 apresenta a comparação entre o método de FFT e a simulação no ATPDraw para o sistema com duas barras de fronteira. A Figura 35 apresenta a mesma comparação para o sistema malhado.

As duas simulações ficaram dentro da envoltória do disjuntor, não superando o disjuntor por TRT. O sistema teste, por sua vez, ultrapassou a envoltória, superando o disjuntor pela crista da TRT. Vale ressaltar que o sistema teste era o sistema equivalente com uma barra de fronteira a partir de Santa Maria 3, o que levava a muitas simplificações dos circuitos. As três simulações deveriam apresentar, e apresentaram, níveis de curto-circuito semelhantes na barra de Santa Maria 3.

Apesar das diferenças que podem ser obtidas nos resultados dependendo do nível de modelagem do sistema, o método FFT se demonstrou condizente com os resultados do domínio do tempo sendo uma alternativa para simulações no domínio do tempo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa propôs o estudo e a análise de tensão de restabelecimento transitória (TRT) no domínio da frequência utilizando métodos propostos na academia e sua comparação com os métodos tradicionais de simulação no domínio do tempo. A modelagem de sistemas elétricos para serem estudados no domínio da frequência é mais simples se comparada aos métodos tradicionais no domínio do tempo. Mudanças nos circuitos, adição de linhas ou subestações, troca do disjuntor sob avaliação são operações rápidas, e o seu processamento também.

O método *Fast Fourier Transform* (FFT) demonstrou ser efetivo no cálculo da TRT, usando menos tempo de processamento que as simulações no domínio do tempo.

Após a realização da pesquisa, sugere-se que trabalhos futuros sejam elaborados a partir das metodologias estudadas neste trabalho, como a modelagem de subestações completas no HarmZs; a inclusão de estudos com modelagem parâmetros distribuídos de linhas de transmissão; o uso de informações de curto-circuito e topologia do sistema elétrico de programas como ANAFAS para fazer uma avaliação rápida dos disjuntores críticos; e o uso de metodologias para calcular impedâncias no domínio da frequência, sem a necessidade de usar programas proprietários.

REFERÊNCIAS

- AMETANI, A. The application of the fast fourier transform to electrical transient phenomena. **International Journal of Electrical Engineering Education**, v. 10, n. 4, p. 277-287, 1973.
- ALVES, F. R. **Características do disjuntor para abertura de linha em vazio: metodologia de estudo**. 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2006.
- BIZJAK, G. Circuit breaker model for digital simulation based on Mayr's and Cassie's differential arc equations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 3, 1995.
- BRIGHAMM, E. O. **The fast Fourier transform**. Englewoods Cliffs: Prentice Hall, 1974.
- BRIGHAMM, E. O., "The fast Fourier transform", Prentice Hall, Englewoods Cliffs, N.J. 1974
- CASSIE, A. M. Arc rupture and circuit severity: a new theory. *In*: CONFERENCE INTERNATIONALE DES GRANDS RESEAUX ELECTRIQUES A HAUTE TENSION, Paris, 1932. p. 1-14.
- COOLEY, J. W., TUKEY, J. W. An algorithm for machine computation of Fourier series. **Comput**, v.19, p. 297-301, 1965.
- GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. New York. John Wiley & Sons , 1970. 47p.
- HERMAN, W.; RAGALLER, K. Interaction between arc and network in the ITRV regime. *In*: RAGALLER, K. (ed.). **Current interruption in high-voltage networks.**, Baden: Plenum Press, 1978. p. 205-229.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE STD C37.04**: IEEE standard for ratings and requirements for AC high-voltage circuit breakers with rated maximum voltage above 1000V. New York: IEEE Power & Energy Society, 2018.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE STD C37.06**: IEEE standard for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis: preferred ratings and related required capabilities for voltages above 1000V. New York: IEEE Power & Energy Society, 2017.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE STD C37.011**: IEEE guide for the application of transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers with rated maximum voltage above 1000V. New York: IEEE Power & Energy Society, 2019.
- CIGRE WG 13.04, **Asymmetrical current breaking tests**, ELECTRA no. 132, pp. 109-125, October/1990;

MAYR, O. Beitrag zue theorie der statischen und der dynamischen lichtbogens. **Archiv fuer Elektrotechnik**, v. 50, p. 204-239, 1931.

MEIRELLES, M. **Principais fenômenos físicos da interrupção de corrente e sua correlação com o desempenho de disjuntores de alta tensão**. Workshop sobre potenciação de disjuntores ar comprimido e SF6, Ativa; Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, 2006.

NAEF, O.; ZIMMERMAN, C. P; BEEHLER, J. E. Proposed transient recovery voltage. **IEE Transactions on Power Apparatus and System**, v. 94, n. 7, p. 580-608, July 1965.

NUSBAUMER, H. J. **Fast Fourier transform and convolution algorithms**. Berlim: Springer, 1982.

PRETO, P. O. **Cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória**. 2017. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2017.

SEMLYEN, A.; DABULEANU, A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 94, n. 2, p. 561-571, 1975.

SILVA, C. D. L. *et al.* Método baseado no domínio da frequência para estimar tensão de restabelecimento transitória em disjuntores de alta tensão. *In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION*, 11., **Anais**, 2015.

SINDER, D. **Métodos de cálculo da tensão de restabelecimento transitória para análise de superação de disjuntores de alta tensão**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

STEURER, M.; HRIBERNIK, W.; BRUNKE, J.H. Calculating the transient recovery voltage associated with clearing transformer determined faults by means of frequency response analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 1, p. 168-173, 2004.

ZENETTA JUNIOR, L. C. Capítulo 15. *In: ZENETTA JUNIOR, L. C. Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência*. São Paulo: Edusp, 2020. Cap. 15. p 561-609.

APÊNDICE A – DADOS HARMZS

1 – Sistema teste: uma barra de fronteira

DGERAIS

FREQUENCIA	60.000000
SBASE	100.0
DADOS	Unidades
INTERFACE	Unidades
METODOLOGIA	YS
TITULO	
IDBARRA	NUMERO

FIM

%

DBAR

1	"SMA3"	230.0	0	1	1
2	"UDCHICA"	230.0	0	1	1
3	"SVICEN"	230.0	0	1	1
4	"Gerador"	230.0	0	1	1

FIM

%

DGBT

1 230.0

FIM

%

DARE

1 Alta_Tensao

FIM

%

DMAQ

4 1

FIM

%

DLIN

2	4	1	1	1.666	15.6224	0.000000	1	1
3	4	1	1	14.97	103.816	0.000000	1	1
1	2	1	1	5.925	33.06250	0.6489	1	1
1	2	2	0	6.179	31.40148	0.648	1	1
1	3	1	1	7.300	40.5214	0.705	1	1

FIM

2 – Sistema com 2 barras de fronteira

DGERAIS

FREQUENCIA 60.000000
 SBASE 100.0
 DADOS Unidades
 INTERFACE Unidades
 METODOLOGIA YS
 TITULO
 IDBARRA NUMERO

FIM

%

DBAR

1	"SMA3"	230.0	0	1	1
2	"UDCHICA"	230.0	0	1	1
3	"UITA"	230.0	0	1	1
4	"SVICEN"	230.0	0	1	1
5	"ALEGRETE"	230.0	0	1	1
6	"Gerador"	230.0	0	1	1

FIM

%

DGBT

1 230.0

FIM

%

DARE

1 Alta_Tensao

FIM

%

DMAQ

6 1

FIM

%

DLIN

2	6	1	1	0.1058	109.3972	0.000000	1	1
3	6	1	1	1.2128	123.9341	0.000000	1	1
5	6	1	1	67.8918	52.08534	0.000000	1	1
3	5	1	1	129.906	417.2646	0.000000	1	1
1	2	1	1	5.925	33.06250	0.6489	1	1
1	2	2	0	6.179	31.40148	0.648	1	1
1	4	1	1	7.893	43.46255	0.705	1	1
2	3	1	1	2.084	11.83375	0.199	1	1
2	3	2	1	2.084	11.6592	0.199	1	1
4	5	1	1	8.321	49.76848	0.883	1	1

FIM

3 – Sistema malhado

DGERAIS

FREQUENCIA 60.000000
 SBASE 100.0
 DADOS Unidades
 INTERFACE Unidades
 METODOLOGIA YS
 TITULO
 IDBARRA NUMERO

FIM

%

DBAR

1	"SMA3"	230.0	0	1	1
2	"DCHICA"	230.0	0	1	1
3	"UITA"	230.0	0	1	1
4	"SVICEN"	230.0	0	1	1
5	"ALEGRETE"	230.0	0	1	1
6	"MACAMBARA"	230.0	0	1	1
7	"SANGELO"	230.0	0	1	1
8	"SANGELO2"	230.0	0	1	1
9	"UPRE"	230.0	0	1	1
10	"LIVRAMENTO"	230.0	0	1	1
11	"BAGE"	230.0	0	1	1
12	"UPME"	230.0	0	1	1
13	"SCRUZ"	230.0	0	1	1
14	"Gerador"	230.0	0	1	1

FIM

%

DGBT

1 230.0

FIM

%

DARE

1 Alta_Tensao

FIM

%

DMAQ

14 1

FIM

%

DLIN

2	14	1	1	0.1058	109.3972	0.000000	1	1
3	14	1	1	1.0850	22.97308	0.000000	1	1
9	14	1	1	3.3840	27.66436	0.000000	1	1
12	14	1	1	0.279841	14.10286	0.000000	1	1
13	14	1	1	13.829	90.4217	0.000000	1	1
5	14	1	1	14.078	268.6473	0.000000	1	1
11	14	1	1	7353.0	15737.0	0.000000	1	1
7	14	1	1	1.278	16.95706	0.000000	1	1

6	14	1	1	41.9	559.8318	0.000000	1	1
13	12	1	1	20.548	107.5401	0.000000	1	1
5	6	1	1	11.074	75.91131	0.000000	1	1
6	7	1	1	26.06	161.6736	0.000000	1	1
7	9	1	1	136.31	491.9734	0.000000	1	1
8	9	1	1	15.8	74.18054	0.000000	1	1
1	2	1	1	5.925	33.0625	0.648900	1	1
1	2	2	0	6.179	31.40148	0.648	1	1
1	4	1	1	7.893	43.46255	0.705	1	1
2	3	1	1	2.084	11.83375	0.199	1	1
2	3	2	1	2.084	11.6592	0.199	1	1
4	5	1	1	8.321	49.76848	0.883	1	1
5	10	1	1	12.981	64.69658	1.099	1	1
11	12	1	1	4.602	25.44502	0.441	1	1
10	11	1	1	15.288	76.38745	1.279	1	1
13	3	1	1	11.691	63.90339	1.106	1	1
5	6	2	1	8.369	41.73292	0.71	1	1
6	7	2	1	11.955	97.12422	1.8	1	1
7	8	1	1	0.265	1.957338	1.87	1	1
9	3	1	1	2.751	15.18219	0.262	1	1

FIM