



**ESTUDO DO FILTRO DIGITAL**  
***DIFFERENTIATOR-SMOOTHER* PARA APLICAÇÕES**  
**BASEADAS NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES**

**LUIZA MENDONÇA AVIANI RIBEIRO**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**ESTUDO DO FILTRO DIGITAL  
*DIFFERENTIATOR-SMOOTHER* PARA APLICAÇÕES  
BASEADAS NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES**

**LUIZA MENDONÇA AVIANI RIBEIRO**

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADA POR:

---

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, DSc. (ENE-UnB)  
(Orientador)

---

Francis Arody Moreno Vásquez, DSc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Eduardo Jorge Silva Leite Júnior, M. (UnB)  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, Dezembro de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, LUIZA MENDONÇA AVIANI

Estudo do Filtro Digital *Differentiator-Smoother* para Aplicações Baseadas na Teoria de Ondas Viajantes. [Distrito Federal] 2019.

xiii, 78p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheira Eletricista, Engenharia Elétrica, 2019).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Faltas em linhas de transmissão

2. Filtro DS

3. Ondas viajantes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBERIO, L. M. A. (2019). Estudo do Filtro Digital *Differentiator-Smoother* para Aplicações Baseadas na Teoria de Ondas Viajantes, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xp.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luiza Mendonça Aviani Ribeiro

TÍTULO: Estudo do Filtro Digital *Differentiator-Smoother* para Aplicações Baseadas na Teoria de Ondas Viajantes.

GRAU: Engenheira Eletricista

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Luiza Mendonça Aviani Ribeiro

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e à Nossa Senhora das Graças por estarem sempre presentes e me possibilitarem concluir este trabalho, superando as dificuldades.

A minha família por todo o apoio e ajuda. Por me incentivarem e apoiarem sempre em qualquer decisão que eu tomasse, acreditando na minha capacidade. Pela paciência quando eu estava estressada com tudo o que precisava fazer. Por todo amor, carinho e suporte. Principalmente aos meus pais Laura Aviani e Cássio Aviani, sem eles concluir esta etapa não seria viável.

Ao meu orientador, Professor Felipe Lopes, por toda transmissão de ensinamentos com didática e paciência.

À todos da SRT/ANEEL, pelos ensinamentos e momentos compartilhados, em especial à minha supervisora Thelma Pinheiro, que sempre foi muito presente, preocupada em ajudar e ensinar.

Aos meus amigos de curso que levarei para toda a vida, os quais fizeram minha graduação mais fácil com toda ajuda em matérias, estudos em grupos e companheirismo durante esses anos. Principalmente ao Guilherme Raposo, Gustavo Leão e Thiago Magalhães por todo apoio nas matérias. Pelo apoio e presença em momentos difíceis e nos alegres, agradeço aos amigos Caio Martins, Fernanda Nunes e Letícia Lima. Ao João Vitor Leite, pelo apoio durante o curso e na realização deste trabalho. Por toda orientação e ajuda acadêmica e profissional, agradeço muito ao meu amigo João Paulo Ribeiro, que nunca deixou de me ajudar em nenhum âmbito e sempre com bastante paciência e diversão.

Aos companheiros do LAPSE, sem os quais a realização do meu TCC teria sido muito mais difícil, ao Gustavo Cunha, Tiago Honorato e Vitor Serpa que me ajudaram muito durante a elaboração de todo o estudo e principalmente ao Eduardo Passos por ter contribuído ativamente durante todo o processo com muita paciência sempre.

À todos os professores com os quais tive oportunidade de adquirir conhecimentos e à UnB,

por contribuir com formação de extrema qualidade social e profissional de seus alunos.

À todos que de alguma forma fizeram parte da minha formação acadêmica, profissional e pessoal, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Apresentam-se, neste trabalho, a implementação, validação e estudos para diferentes aplicações de um modelo computacional do filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS), o qual é utilizado para extração de informações de ondas viajantes visando obter uma localização precisa de faltas, detecção de ondas refletidas, entre outras aplicabilidades. Para tanto, utilizou-se a linguagem MODELS disponível no *Alternative Transients Program* (ATP). Esse modelo consiste em um método de filtragem que é utilizado em um relé microprocessado real para fins de implementação de funções de proteção baseadas na teoria das ondas viajantes (OVs), o relé SEL-T400L. Com o intuito de validar o modelo computacional desenvolvido, as primeiras análises contabilizam a variação dos ajustes presentes no relé, a saber: duração da janela de coeficientes e frequência de amostragem. Dessa forma, verifica-se o impacto de cada configuração sobre a saída do filtro, bem como são identificadas as mais adequadas à extração das OVs de interesse. Adicionalmente, aplica-se o filtro em diferentes sistemas elétricos de potência cujas linhas de transmissão são modeladas seguindo os modelos de Bergeron e J. Marti, considerando linhas com transposição real, ideal e não transposta a parâmetros constantes na frequência bem como variantes com a mesma. Dos resultados obtidos, torna-se possível adquirir uma robusta validação do filtro, constatando-se que o desempenho desse melhora com o aumento da frequência de amostragem utilizada, bem como fica evidenciado a influência que a modelagem adotada para as linhas de transmissão apresenta sobre os transitórios eletromagnéticos lançadas no ponto de falta, influenciando, portanto, a localização de faltas obtida a partir de OVs extraídas via filtro DS.

**Palavras-chave:** Filtro DS, MODELS/ATP, ondas viajantes, linhas de transmissão, localização de falta, modelagens de linhas de transmissão.

## ABSTRACT

In this work, the implementation, validation and studies for different applications of a computational model of the Differentiator-Smoother filter (DS filter) is presented, which is used to detect traveling waves (TW) in order to obtain an accurate fault location. For this, was used the MODELS language available in the Alternative Transients Program (ATP). This model consists of a filtering method that is used in a real microprocessor relay for the purpose of implementing protection function based on TW theory, the SEL-T400L relay. In order to validate the computational model develop, the first analyzes account for the variation of the settings present in the relay, namely: coefficient window length and sampling frequency. This way, the impact of each setting on the filter output is verified, as well as the ones most suitable for the extraction of the TWs of interest are identified. In addition, the filter is applied to different electrical power systems whose transmission lines are modeled following the Bergeron and J. Marti models, considering lines with real, ideal transposition and not transposed to constant frequency parameters as well as variants with the same. From the obtained results, it is possible to acquire a robust filter validation, noting that the performance of this improves with the increase of sampling frequency used, as well as the influence that the modeling adopted for the transmission lines has on the electromagnetic transients thrown at the fault point is shown, thus influencing the fault location obtained from TWs extracted from the DS filter.

**Keywords:** DS filter, MODELS/ATP, traveling waves, transmission lines, fault location, transmission lines modeling.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	v
<b>Lista de Símbolos</b>	vi
<b>Glossário</b>	viii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Objetivos do Trabalho . . . . .	3
1.3 Organização do Texto . . . . .	4
<b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>	5
2.1 Faltas em Linhas de Transmissão . . . . .	5
2.1.1 Modelos de LTs . . . . .	6
2.2 Teoria das OVs . . . . .	6
2.3 Métodos de Modelagem de Linhas de Transmissão . . . . .	12
<b>Capítulo 3 – Filtro <i>Differentiator-Smoother</i></b>	14
3.1 Filtro DS . . . . .	14
3.1.1 Ganho Unitário e Janela de Coeficientes . . . . .	15
3.1.2 Resposta na Frequência . . . . .	18
<b>Capítulo 4 – Descrição dos Sistemas Avaliados</b>	20
4.1 Modelagem do Filtro DS . . . . .	20
4.1.1 Sistema Analisado . . . . .	20
4.2 Sistemas Bergeron e J. Marti . . . . .	23

---

<b>Capítulo 5 – Análise e Validação dos Resultados</b>	<b>25</b>
5.1 Validação da Resposta em Frequência . . . . .	25
5.2 Variação da Janela de Coeficientes . . . . .	28
5.2.1 Domínio do Tempo . . . . .	28
5.2.2 Domínio do Frequência . . . . .	29
5.3 Variação da Frequência de Amostragem . . . . .	31
5.3.1 Domínio do Tempo . . . . .	31
5.3.2 Domínio da Frequência . . . . .	33
5.4 Análise de Transitórios Atenuados . . . . .	34
5.5 Aplicação do filtro DS em diferentes modelagens de linhas . . . . .	35
5.5.1 Terminal Local . . . . .	35
5.5.2 Terminal Remoto . . . . .	39
5.5.3 Posição da Falta . . . . .	40
<b>Capítulo 6 – Conclusão e Propostas Futuras</b>	<b>43</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Circuito Equivalente de um Segmento de Linha de Transmissão (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2014). . . . .	7
2.2	OVs de tensão lançadas na LT. . . . .	11
3.1	Valor de $G$ para obtenção de ganho unitário (LOPES <i>et al.</i> , 2019). . . . .	16
3.2	Aplicação do filtro DS. . . . .	17
3.3	Resposta em frequência com escala logarítmica e ganho em decibéis (GUZMÁN <i>et al.</i> , 2017). . . . .	18
3.4	Resposta em frequência com ganho em p.u.. . . . .	19
4.1	Representação do modelo de LT avaliada. . . . .	21
4.2	Configuração da torre típica da LT avaliada. . . . .	22
4.3	Representação do modelo de LT usada para validação da resposta transitória (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2019). . . . .	23
4.4	Representação do modelo de LT transposta. . . . .	24
5.1	Espectro de frequência para o caso de 35350 Hz (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2019). . . . .	26
5.2	Mapeamento da resposta em frequência do filtro DS do relé SEL-T400L sobreposta com a resposta do filtro DS modelado. . . . .	26
5.3	Sinais de pré falta e no momento da falta. . . . .	28
5.4	Impacto do $T_{DS}$ sobre a saída do filtro DS. . . . .	29
5.5	Impacto do $T_{DS}$ sobre a resposta em frequência do filtro DS. . . . .	30
5.6	Resposta em frequência com escala logarítmica e ganho em dB. . . . .	30

---

5.7	Impacto do $T_{DS}$ sobre a saída do filtro DS com $F_s = 10$ MHz. . . . .	32
5.8	Comparação da saída do filtro DS com $F_s = 1MHz$ e $F_s = 10$ MHz. . . . .	32
5.9	Impacto do $T_{DS}$ sobre a resposta em frequência do filtro DS com $F_s = 10$ MHz. .	33
5.10	Comparação da saída do filtro DS em frequência com $F_s = 1$ MHz e $F_s = 10$ MHz.	34
5.11	Respostas do filtro DS para transitórios com diferentes atenuações. . . . .	34
5.12	Resposta do filtro DS em terminal local diante de seis sistemas distintos. . . . .	36
5.13	Resposta do filtro DS com modo $\alpha$ e 0 desacoplados. . . . .	36
5.14	Comportamento do filtro DS em terminal remoto diante de seis sistemas distintos.	38
5.15	Resposta do filtro DS em terminal remoto diante de seis sistemas distintos. . . .	39
5.16	Resposta do filtro DS em terminal local diante de seis sistemas distintos para falta localizada no meio da linha. . . . .	41

## LISTA DE TABELAS

4.1	Parâmetros da linha. . . . .	21
4.2	Parâmetros da linha (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2019). . . . .	23
5.1	Relação Frequência X Ganho para filtro DS real e modelado. . . . .	27
5.2	Amplitude e tempo de cada sinal. . . . .	38
5.3	Amplitude e tempo de cada sinal. . . . .	40
5.4	Amplitude e tempo de cada sinal. . . . .	41

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta x$	Tamanho de um segmento de linha de transmissão.
$R$	Resistência da linha de transmissão.
$L$	Indutância da linha de transmissão.
$C$	Capacitância da linha de transmissão.
$G$	Condutância da linha de transmissão.
$\frac{\delta}{\delta t}$	Operador Heaviside usado para obter equações de corrente e tensão de ondas viajantes.
$Z$	Impedância da linha de transmissão.
$Y$	Admitância da linha de transmissão.
$\gamma$	Constante de propagação na linha de transmissão.
$Z_c$	Impedância característica da linha de transmissão.
$Z_s$	Impedância de surto.
$R_f$	Resistência de falta.
$V_f$	Tensão de pré-falta.
$V_{ov}$	Amplitude de tensão da onda viajante.
$i_{ov}$	Amplitude de corrente da onda viajante.
$V_{nom}$	Amplitude de tensão nominal da linha de transmissão.
$\theta$	Ângulo de incidência da falta.
$T_{DS}$	Duração da janela de coeficientes utilizada no filtro DS.
$N_{DS}$	Tamanho da janela de coeficientes utilizada no filtro DS em número de amostras.

---

$F_s$	Frequência de amostragem utilizada no filtro DS.
$G$	Ganho aplicado ao filtro DS para obter ganho unitário.
$A$	Amplitude do transitório.
$\Delta t$	Período de amostragem do sinal.

## GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
AT	Falta da fase A para terra
CT	Falta da fase C para terra
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PAR	Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN
SEE	Sistema de Energia Elétrica
OV	Onda Viajante
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema
PR	Procedimento de Rede
DS	<i>Differentiator-Smoother</i>
TC	Transformador de Corrente
SIN	Sistema Interligado Nacional
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
HFS	<i>Harmonic Frequency Source</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
TWD	Transformada de Wavelet Discreta
TWDR	Transformada de Wavelet Discreta Redundante
TDQ	Transformada de Park
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>

UnB      Universidade de Brasília

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A eletricidade, desde sua descoberta, tem sido responsável por grandes feitos, inovações e pela evolução presente em todos os outros setores. A energia elétrica permitiu avanços tecnológicos relevantes que são base para a vida de muitas pessoas e organizações. Dessa forma, o mundo tem se tornado cada vez mais dependente da energia, aumentando a sua demanda.

O setor elétrico brasileiro passou a ser considerado uma infraestrutura crítica através da Portaria Nº 02 do Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República, de 8 de fevereiro de 2008, ou seja, o setor de energia afeta diretamente a consecução e a continuidade da missão do Estado e a segurança da sociedade, atingindo outros setores como o político, econômico e social (PR, 2010).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) contém sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia interconectando todas as regiões do país de forma a prover energia elétrica com elevados índices de qualidade e confiabilidade. Com o crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil, aumentou-se significativamente a quantidade de usinas geradoras, sendo prevista pelo Operador do Sistema Elétrico Nacional (ONS) uma capacidade instalada de 170.663 MW para o ano de 2020 (ONS, 2017). Para fazer com que a totalidade dessa produção alcance toda a população, entregando energia mesmo em áreas remotas, é necessário o uso de linhas de transmissão (LTs). É notável que a matriz energética brasileira ainda possui forte predominância de usinas hidroelétricas, as quais, devido à concentração das grandes bacias hidroelétricas em áreas isoladas do território nacional, encontram-se em regiões isoladas do país. Neste contexto, faz-se necessária extensa malha transmissora de energia elétrica para interconectar as grandes centrais geradoras aos centros de consumo de energia elétrica. Dessa forma, o SIN é composto, em sua maioria, por LTs (RANGEL, 2009).

A constante evolução da capacidade de geração no Brasil traz a necessidade da expansão das LTs nos Sistemas Energia Elétrico (SEE). O ONS, no Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN (PAR) 2017-2019, calcula que no horizonte de 2019 ocorra a ampliação de LTs em 10.836 km, sendo que para 2023, o previsto é que o Brasil possua um total de 174.093 km de LTs em sua extensão territorial (ONS, 2017).

Quando se trata de curtos-circuitos nos sistemas de energia elétrica, de 80 a 90% ocorrem em LTs (TLEIS, 2008), sendo que, tipicamente, 50% são em linhas aéreas (METELLO, 2012). As LTs ficam mais sujeitas à maior parte das falhas que ocorrem em um SEE por percorrem longas distâncias, sendo as aéreas ainda mais expostas a possíveis danos. Esses distúrbios podem ter causas naturais como ventos, chuvas e descargas atmosféricas ou outras causas como ações de vandalismo. A atuação do sistema de proteção tem seu tempo máximo para eliminação do defeito descrita em Procedimento de Rede (PR) pelo ONS, o qual determina que não ultrapasse 100 ms (ONS, 2016). Diante deste cenário, é perceptível a importância de sistemas de proteção capazes de agir de forma rápida para mitigar defeitos.

A proteção tem que atuar de tal maneira a preservar equipamentos e pessoas, deixando a rede segura. Além disso, o sistema de proteção precisa ser confiável para promover desligamentos seletivos, evitando grandes *blackouts* (RIBEIRO, 2017). Além da proteção, é importante a realização da localização da falta, para que o problema possa ser rapidamente corrigido e a LT fique indisponível pelo menor tempo possível. Neste contexto, para que índices de qualidade e continuidade permaneçam dentro dos limites toleráveis, faz-se necessário manter o ativo disponível pelo maior tempo possível. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) prevê incentivos econômicos em resolução normativa com o propósito das concessionárias de transmissão de energia prestarem o serviço com alta taxa de continuidade, restabelecendo a energia rapidamente (ANEEL, 2016). Para tanto, os métodos utilizados para localização de faltas devem ser os mais precisos possíveis.

Com o avanço da tecnologia digital, as funções de proteção e localização de faltas passaram a ser disponibilizadas em um único dispositivo: o relé microprocessado. Portanto, neste trabalho, o objeto de estudo encontra-se disponível em um relé que utiliza unicamente funções aplicadas no domínio do tempo, as quais não requerem o processo de estimação fasorial, tornando-as mais rápidas. Adicionalmente à possibilidade de reunir em um único dispositivo funções de proteção

e localização de faltas, outras vantagens dos relés digitais incluem acurácia, maior sensibilidade à falhas, melhor seletividade, flexibilidade, facilidade de uso e testes e outro benefício seria a operação e parametrização dos equipamentos através de um terminal remoto, utilizando as tecnologias de comunicação (GLOVER *et al.*, 2011).

Dentre os métodos existentes, aqueles baseados na análise de transitórios eletromagnéticos, sejam de proteção ou de localização de faltas, têm sido cada vez mais utilizados (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Neste contexto, funções de proteção e localização de faltas baseadas na teoria de ondas viajantes têm atraído o interesse de empresas (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Dentre a diversidade de técnicas para extração e análise de OV's reportadas na literatura, destacam-se (LOPES *et al.*, 2019): as transformadas wavelet discreta (TWD) e discreta redundante (TWDR) (COSTA, 2014), transformada de Park (TDQ) (LOPES *et al.*, 2013), filtros digitais FIR (ZIMATH *et al.*, 2010), filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS) (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Dentre as técnicas para extração e análise de OV's supracitadas, nos últimos anos, tem-se destacado uma em particular: o filtro DS, que tem sido empregado em um relé real. Esse filtro cria padrões de saída bem definidos para os sinais aplicados a sua entrada, mantendo-se polaridade e amplitude, facilitando, assim, a análise de OV's lançadas na linha a partir do ponto de falta (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Dessa forma, a análise desses transitórios eletromagnéticos por meio dessa técnica de filtragem permite identificar informações relevantes para a localização de faltas e atuação do sistema de proteção, como amplitude, polaridade e instante de chegada da OV no terminal monitorado. Perante o exposto, fica evidenciado os benefícios da aplicação do filtro para as funções de proteção rápidas e algoritmos de localização de faltas baseadas na análise de OV's. Em virtude da importância do filtro DS para aplicações reais atualmente disponíveis no mercado, a modelagem, validação, aplicação e análise de suas respostas em diferentes cenários torna-se importante.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é avaliar o filtro DS disponível no relé da *Schweitzer Engineering Laboratories* SEL-T400L, destacando seu funcionamento, configurações e conceitos. Ainda,

tem-se como objetivo utilizar uma modelagem computacional do filtro, validando-o junto ao relé SEL-T400L, avaliando, ao final, a performance do modelo computacional desenvolvido perante diferentes modelagens de LTs. Assim, os objetivos específicos são:

- Modelar o filtro DS de forma que tenha resultados compatíveis com o do relé SEL-T400L;
- Avaliar configurações padrões do relé e analisar o desempenho do filtro;
- Analisar o impacto de diferentes modelagens de LTs, simuladas via ATP (*Alternative Transients Program*), sobre a saída do filtro e detecção de OV.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte maneira:

- No capítulo 2, abordam-se os conceitos teóricos de faltas em linhas de transmissão, teoria das ondas viajantes e método de modelagem de LTs;
- No capítulo 3, descreve-se o filtro DS e suas configurações;
- No capítulo 4, citam-se as configurações do filtro que serão estudadas e apresentam-se as modelagens de LTs no ATP utilizadas para cada análise;
- No capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos a partir das simulações realizadas em ATP considerando diferentes sistemas, formas de modelagens das linhas monitoradas e ajustes do filtro DS, validando o modelo computacional desenvolvido;
- Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas para futuros trabalhos que possam dar continuidade a este estudo.

## CAPÍTULO 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os parâmetros das linhas de transmissão ( $R$ ,  $L$ ,  $G$  e  $C$ ) são bem definidos e aproximadamente constantes durante o regime permanente (LOPES, 2014). Algumas das variações que podem apresentar estão principalmente relacionadas com fatores ambientais, como o clima e vegetação (ZANETTA, 2003). Dessa forma, ao ocorrer modificações relevantes de tais parâmetros devido a distúrbios, transitórios aparecem devido à redistribuição de energia no sistema para alcançar as novas condições de operação (GREENWOOD, 1991). Neste contexto, a amplitude desses sinais depende das características de operação e de aterramento da linha de transmissão monitorada (ZANETTA, 2003).

O SEE está vulnerável a diversos tipos de distúrbios como: tempestades, neve, relâmpagos, quebra de isolamento e curtos-circuitos causados por objetos externos (SAHA, 2010). Dentre as inúmeras consequências provocadas pelos distúrbios apresentados, as faltas em LTs são as mais preocupantes devido aos impactos que podem gerar na rede. De fato, requerem uma resposta rápida do sistema de proteção para isolar o elemento protegido, pois falhas, atrasos ou respostas inadequadas da proteção podem levar a problemas maiores na operação e funcionamento da rede de transmissão (ANDERSON, 1999).

Mudanças repentinas nas condições de operação decorrentes de faltas induzem OV's nas linhas a partir do ponto de defeito (LOPES *et al.*, 2019). Cada onda possui informações intrínsecas e relevantes ao distúrbio que a causou e por isso a análise do padrão de onda gerada é importante para fornecer dados a respeito do local da falta (LOPES, 2014; SAHA, 2010; FAYBISOVICH *et al.*, 2010). Dessa forma, a avaliação da OV na LT requer o uso de técnicas de filtragem adequadas para conseguir extrair informações confiáveis para localizar a falta (LOPES *et al.*, 2019).

### 2.1.1 Modelos de LTs

No geral, existem dois tipos de modelos de linha (SAHA, 2010):

- modelo a parâmetros concentrados; e
- modelo a parâmetros distribuídos.

O modelo a parâmetros concentrados representa uma linha com elementos concentrados em um nó, os quais são tipicamente calculados em uma única frequência, sendo esta normalmente a fundamental. Cálculos de localização de faltas em estado estacionário ou transientes simulados perto da frequência considerada podem ser realizados usando esse modelo (SAHA, 2010). Ao contrário do modelo a parâmetros concentrados, o modelo a parâmetros distribuídos é usado para representações mais precisas da linha, principalmente de linhas longas quando se deseja representar a propagação de OVs, e podem ser categorizados da seguinte forma:

- modelo de parâmetro constante na frequência;
- modelo de parâmetro dependente da frequência.

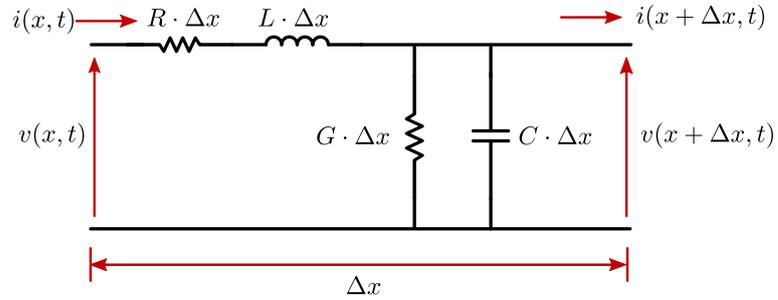
No modelo a parâmetro concentrado, variações em um terminal da linha são instantaneamente percebidos no outro, o que é inviável na prática, uma vez que as ondas possuem um tempo para se propagarem entre os terminais. Para linhas de pequena extensão, esse tempo é curto, podendo ser desconsiderado, de modo que o uso de parâmetros concentrados não prejudica a análise. Porém, em LTs longas, esse tempo é maior e não pode ser desprezado, sendo necessário o uso de modelos mais precisos como o de parâmetros distribuídos (LOPES, 2014).

## 2.2 TEORIA DAS OVS

OVS são geradas por perturbações que fazem o sistema variar abruptamente. Com isso, OVS de tensão e corrente são lançadas a partir do local da falta em LTs. Esses sinais como função do espaço e tempo, dão a ideia de propagação ao longo das LTs com variações temporais, isso quando considerados modelos a parâmetros distribuídos (GLOVER *et al.*, 2011). Tipicamente, em LTs aéreas, as OVs se propagam aproximadamente na velocidade da luz tanto para o terminal remoto quanto para o local e mesmo assim existe diferença no tempo de propagação de cada onda, devido à variabilidade observada quanto ao local de ocorrência da falta cada terminal

percebe o transitório em momentos distintos (SLUIS, 2001). Por isso é importante que as LTs para o estudo de transitórios a partir de OVs sejam modeladas a parâmetros distribuídos (RIBEIRO, 2017), permitindo a análise dos tempos de trânsito das OVs desde a falta até os pontos de medição.

Para conseguir entender melhor as OVs, identificá-las e analisá-las de forma correta, é preciso conhecer a teoria e os fundamentos relacionados. A análise é feita considerando a LT como um modelo a parâmetros distribuídos. Neste contexto, um segmento de LT de tamanho infinitesimal  $\Delta x$ , contendo resistência  $R$ , indutância  $L$ , condutância  $G$  e capacitância  $C$  por unidade de comprimento é ilustrado na Figura 2.1 para facilitar a compreensão dos conceitos avaliados (SCHWEITZER *et al.*, 2014).



**Figura 2.1.** Circuito Equivalente de um Segmento de Linha de Transmissão (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Utilizando as Leis de Kirchoff da tensão (2.1) e da corrente (2.2) pode-se relacionar as tensões e correntes com os pontos  $x$  e  $\Delta x$  (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}. \quad (2.2)$$

Para se obter a variação de tensão e corrente em relação a posição  $\Delta x$ , divide-se as duas equações por  $\Delta x$  e assume-se que  $\Delta x$  tende a zero. Em sequência, substitui-se o operador Heaviside  $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)$  por  $s$ , para transformar as equações no domínio do tempo para Laplace. Assim, obtêm-se:

$$\frac{\partial v(x, s)}{\partial x} = -(R + sL) \cdot i(x, s), \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial i(x, s)}{\partial x} = -(G + sC) \cdot v(x, s), \quad (2.4)$$

em que o sinal negativo presente em (2.3) e (2.4) indica que a amplitude da OV diminui quando  $x$  aumenta (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

A seguir, iniciam-se algumas manipulações matemáticas com o objetivo de isolar adequadamente de (2.3) e (2.4) as grandezas de corrente e tensão. Primeiramente, a seguinte substituição é executada:

$$Z = R + sL, \quad (2.5)$$

$$Y = G + sC, \quad (2.6)$$

onde  $Z$  é a impedância da linha e  $Y$ , a admitância.

Assim, obtêm-se que:

$$\frac{\partial v(x, s)}{\partial x} = -Z \cdot i(x, s), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial i(x, s)}{\partial x} = -Y \cdot v(x, s). \quad (2.8)$$

O próximo passo é derivar (2.7) e (2.8) em relação a  $x$  obtendo (2.9) e (2.10).

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = -Z \cdot \frac{\partial i(x, s)}{\partial x}, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = -Y \cdot \frac{\partial v(x, s)}{\partial x}. \quad (2.10)$$

Para concluir a separação dos sinais de corrente e tensão em equações isoladas, substitui-se (2.7) em (2.10) e (2.8) em (2.9), obtendo-se assim, as equações de corrente e tensão das OVs que se propagam através de LTs:

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} = Z \cdot Y \cdot v(x, s), \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = Y \cdot Z \cdot i(x, s). \quad (2.12)$$

A constante de propagação ( $\gamma$ ) é conhecida como sendo a raiz quadrada do produto da impedância  $Z$  com a admitância  $Y$ :

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}. \quad (2.13)$$

Desse modo, obtêm-se as seguintes equações:

$$\frac{\partial^2 v(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot v(x, s) = 0, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot i(x, s) = 0. \quad (2.15)$$

As equações acima descrevem as OVs em LTs no domínio de Laplace, consistindo em soluções gerais, que independem das condições de contorno iniciais, as quais são dadas por (2.16) e (2.17):

$$v(x, t) = v_I e^{-\gamma x} + v_R e^{\gamma x}, \quad (2.16)$$

$$i(x, t) = i_I e^{-\gamma x} + i_R e^{\gamma x}, \quad (2.17)$$

concluindo, a partir de (2.16) e (2.17), que as ondas de tensão e corrente são geradas pela superposição de componentes, tendo as ondas progressivas ( $v_I e^{-\gamma x}$  e  $i_I e^{-\gamma x}$ ) e as ondas regressivas ( $v_R e^{\gamma x}$  e  $i_R e^{\gamma x}$ ).

Uma informação importante nos estudos de OVs é a impedância característica da linha de transmissão ( $Z_c$ ), a qual é definida pela razão entre ondas de tensão e corrente, mantendo-se constantes tanto para a razão entre as componentes incidentes quanto para as refletidas, ou seja, depende apenas dos parâmetros da linha, conforme mostrado em (2.18).

$$Z_c = \frac{v_I}{i_I} = -\frac{v_R}{i_R} = \sqrt{\frac{Z}{Y}}. \quad (2.18)$$

Assim, a solução geral pode ser expressa com  $i(x, t)$  como uma função de  $v_I$ ,  $v_R$  e  $Z_c$ :

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_c} (v_I e^{-\gamma x} - v_R e^{\gamma x}). \quad (2.19)$$

Os estudos de OVs envolvem a avaliação de altas frequências, o que demanda que o sistema seja modelado a parâmetros distribuídos, uma vez que as dimensões físicas das LTs e os comprimentos de onda avaliados passam a ter a mesma ordem de grandeza. Em altas frequências, as partes imaginárias da impedância da linha  $Z$  e da admitância  $Y$  são muito maiores que as partes reais, relacionadas às perdas na linha e por isso  $R$  e  $G$  podem ser desprezadas em estudos de OVs em LTs. Como resultado, obtêm-se uma impedância chamada impedância de surto  $Z_s$ , sendo expressa conforme apresentado em (2.20). Portanto, em cálculos de OVs em LTs, a impedância de surto é normalmente considerada (RIBEIRO, 2017).

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.20)$$

A propagação de OVs em LTs é representada na Figura 2.2 por um circuito de falta pura, onde (RIBEIRO *et al.*, 2018):

- $R_f$  : resistência de falta;
- $Z_s$  : impedância de surto;
- $V_f$  : tensão de pré-falta;
- $V_{ov}$  : amplitude da OV de tensão;
- $i_{ov}$  : amplitude da OV de corrente;

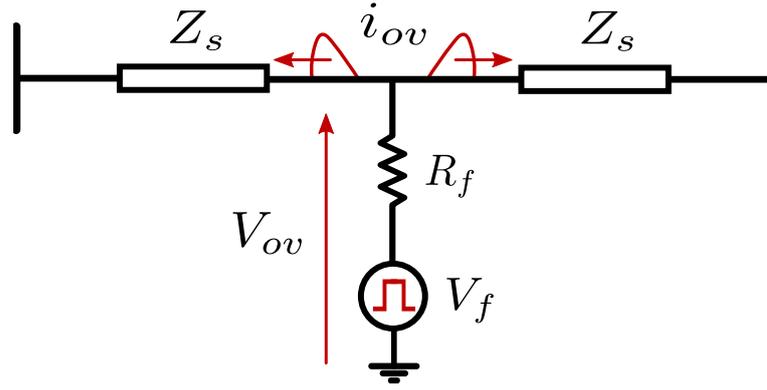
Dessa forma, as amplitudes das OVs para tensão e correntes para um sistema monofásico, respectivamente, podem ser calculadas de acordo com (2.21) e (2.22) (RIBEIRO *et al.*, 2018):

$$V_{ov} = \frac{Z_s \cdot V_{nom} \cdot \text{sen } \theta}{Z_s + 2 \cdot R_f}, \quad (2.21)$$

$$i_{ov} = \frac{V_{ov}}{Z_s} = \frac{V_{nom} \cdot \text{sen } \theta}{Z_s + 2 \cdot R_f}. \quad (2.22)$$

Sendo que a tensão pré falta é:  $V_f \approx V_{nom} \cdot \text{sen } \theta$ .

É relevante, também, analisar o SEP com um conjunto de variáveis auxiliares obtidas das correntes e tensões de fase por uma transformação linear. Essas transformações são selecionadas



**Figura 2.2.** OVs de tensão lançadas na LT.

com o intuito de simplificar a análise ao aproveitar as vantagens de relações específicas entre os parâmetros no sistema trifásico ou de relações específicas entre sinais de fase. Visando a análise de faltas, componentes simétricos são as transformações mais usuais utilizadas para sistemas de potência, porém, esses se aplicam aos fasores de corrente e tensão e não para valores instantâneos, como em OVs. Nesse contexto, utiliza-se a Transformada de Clarke para analisar OVs decorrentes de faltas (SCHWEITZER *et al.*, 2014). A Transformada de Clarke com referência à fase A é definida em (2.23):

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Os três modos são o zero (0), alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). Cada modo é excitado de uma maneira diferente. Nesse contexto, se as mesmas correntes passarem pelos condutores A, B e C e retornarem para a terra, apenas o modo zero é excitado, se toda a corrente passar pela fase A e retornar para a B e C, apenas o modo alfa é excitado e por último, se a corrente passar por B e retornar em C, apenas beta é excitado (SCHWEITZER *et al.*, 2014). As componentes desses modos calculadas por Clarke com referência a fase A funcionam bem para faltas AT e BC, mas não apresentam bons resultados para outros tipos de faltas. Assim sendo, pode-se usar três ajustes da transformada de Clarke com referência na fase A, fase B e fase C para abranger todos os tipos de falta:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha^A \\ I_\beta^A \\ I_0^A \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha}^B \\ I_{\beta}^B \\ I_0^B \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha}^C \\ I_{\beta}^C \\ I_0^C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Cada modo apresenta, no geral, características de impedância, atenuação e dispersão diferentes. O modo zero apresenta maior atenuação e dispersão do que os modos alfa e beta, sendo, por isso, menos apropriado para localização de faltas por OV's.

## 2.3 MÉTODOS DE MODELAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Diversos métodos para modelar linhas de transmissão e simular transitórios são conhecidos atualmente. Neste trabalho, o foco será em técnicas que se têm como base a propagação de ondas com parâmetros constantes e variantes na frequência, a saber: Bergeron e J. Marti, respectivamente.

O modelo desenvolvido por Luis Bergeron não leva em conta o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais da linha e é baseado em linhas de transmissão sem perdas durante a propagações de ondas, concentrando as perdas externamente nas extremidades. Modela-se a linha a parâmetros distribuídos no domínio do tempo e pode ser utilizado para simulações de transitórios que resultem de manobras/chaveamento ou de faltas e descargas atmosféricas (CABELLERO, 2014; DOMMEL, 1969).

Ao se utilizar representação no domínio da frequência, é necessária a utilização de transformadas inversas de Fourier e/ou Laplace para se obter a resposta no domínio de tempo. Além disso, modelos desenvolvidos no domínio da frequência apresentam outras dificuldades como a inclusão de elementos não lineares no sistema e o fato de muitos dos *softwares* que simulam transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia serem desenvolvidos diretamente no domínio do tempo (CABELLERO, 2014; MARTI, 1988). Por isso as técnicas que desconsideram o efeito da frequência ao serem desenvolvidas obtiveram maior fama, sendo mais utilizadas.

A inclusão do efeito da frequência nos parâmetros é importante, uma vez que alguns parâmetros utilizados atualmente no sistema de transmissão são dependentes da frequência (CA-

BELLERO, 2014). Modelos que assumem parâmetros constantes na frequência, como 60 Hz por exemplo, não possuem uma resposta adequada sobre as diversas frequências presentes no sinal durante condições transitórias. Em representações com parâmetros constantes, normalmente ocorre uma ampliação das componentes harmônicas mais elevadas e a consequente distorção das formas de onda e picos de magnitude elevadas (MARTI, 1982). Dessa maneira, J. Marti desenvolveu um novo método rápido e confiável que leva em consideração o efeito de toda a faixa de frequência sobre os parâmetros da LT (MARTI, 1982). No presente trabalho, ambas as técnicas de modelagem apresentadas por Bergeron e Marti (1982), serão empregadas para representação dos sistemas de transmissão.

# FILTRO *DIFFERENTIATOR-SMOOTHER*

A importância e o motivo de se utilizar o filtro DS para detectar OV's e a partir delas localizar faltas já foi explicitado anteriormente. Para compreender mais sobre o filtro é necessário entender sobre seus ajustes e o impacto que causam na representação da OV. Para tanto, implementou-se o filtro com diferentes ajustes, analisando transitórios gerados pela falta em um sistema de transmissão genérico, a partir de um bloco funcional MODELS do programa ATP.

A validação do modelo computacional implementado utilizando a linguagem MODELS do ATP foi realizada a partir da comparação de desempenho entre esse e o filtro real presente no relé SEL-T400L. Neste contexto, visando facilitar a compreensão dos resultados apresentados ao longo deste trabalho, apresentam-se, a seguir, as características e ajustes característicos ao filtro DS.

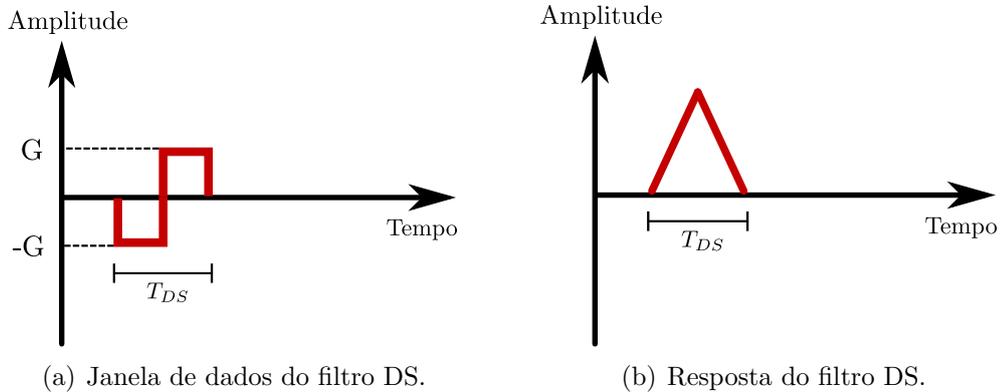
### 3.1 FILTRO DS

O filtro DS possui duas etapas: o sinal primeiro passa por uma suavização (*Smoother*) e depois por uma diferenciação (*Differentiator*), sendo uma seguida da outra. Cada etapa é melhor descrita a seguir (SCHWEITZER *et al.*, 2014; RIBEIRO, 2017):

- etapa de suavização: etapa em que efeitos de distorção dos sinais de corrente e tensão são levemente reduzidos, deixando, assim, a borda de subida dos transitórios mais suave;
- etapa de diferenciação: os sinais com características parecidas com a forma de degrau são transformados em um sinal com formato triangular.

É utilizada uma janela de dados durante o processo de filtragem, sendo este realizado no domínio do tempo e amostra por amostra. A janela de dados contém os coeficientes do filtro com duração  $T_{DS}$  e ganho que vai de  $-G$  até  $G$ , conforme representado na Figura 3.1(a). A

resposta em formato triangular obtida através da etapa de diferenciação do filtro é ilustrada na Figura 3.1(b).



Idealmente, o filtro DS possui saída tipicamente triangular relacionada às entradas sob a forma de degrau. Sabe-se que, nos sistemas reais, as OV's sofrem atenuações e dispersões. Portanto, entradas perfeitas sob a forma de degrau podem não existir. Assim sendo, variações quanto ao padrão de saída do filtro, são observadas. Neste contexto, o fabricante optou por obter uma saída na forma de onda triangular, com ganho unitário, o que favorece a identificação da amplitude da OV e o instante de incidência da onda no ponto de medição. Além disso, utiliza uma janela de coeficientes de  $20 \mu\text{s}$  de duração ( $T_{DS}$ ) e uma frequência de amostragem ( $F_s$ ) de 1 MHz. Todavia, foi observado que a duração da janela de coeficientes real é de  $21 \mu\text{s}$ , pois é considerado que um coeficiente central é igual a zero (RIBEIRO *et al.*, 2019).

### 3.1.1 Ganho Unitário e Janela de Coeficientes

O filtro DS foi idealizado para possibilitar manter a amplitude das variações observadas em sua entrada. Dessa maneira, o ganho unitário só é possível quando aplica-se ganho  $G$  nos  $N_{DS}$  coeficientes do filtro (LOPES *et al.*, 2019), sendo que a primeira metade dos coeficientes  $\frac{N_{DS}-1}{2}$  tem ganho  $-G$ , o coeficiente central ( $\frac{N_{DS}+1}{2}$ ) é nulo e de  $\frac{N_{DS}+1}{2} + 1$  até o coeficiente  $N_{DS}$  tem ganho  $G$ .

Para que o filtro DS conserve em sua saída a amplitude dos transitórios observados em sua entrada, o procedimento de ajuste de ganho unitário é necessário, o qual é apresentado na Figura 3.1, em que uma janela de coeficientes passa por um sinal de corrente na forma de degrau de amplitude  $A$  que pode ser compreendido em 3 partes (LOPES *et al.*, 2019):

- parte 1 - a janela de coeficientes do filtro encontra-se toda antes do início do degrau;
- parte 2 - a janela está centralizada na subida do degrau;
- parte 3 - a janela está completamente depois do início do degrau.

Como a saída do filtro é o resultado do produto interno entre os coeficientes do filtro e o sinal de entrada, os valores da corrente de saída do filtro ( $i_{OV}$ ) para cada parte são obtidos da seguinte forma:

parte 1:

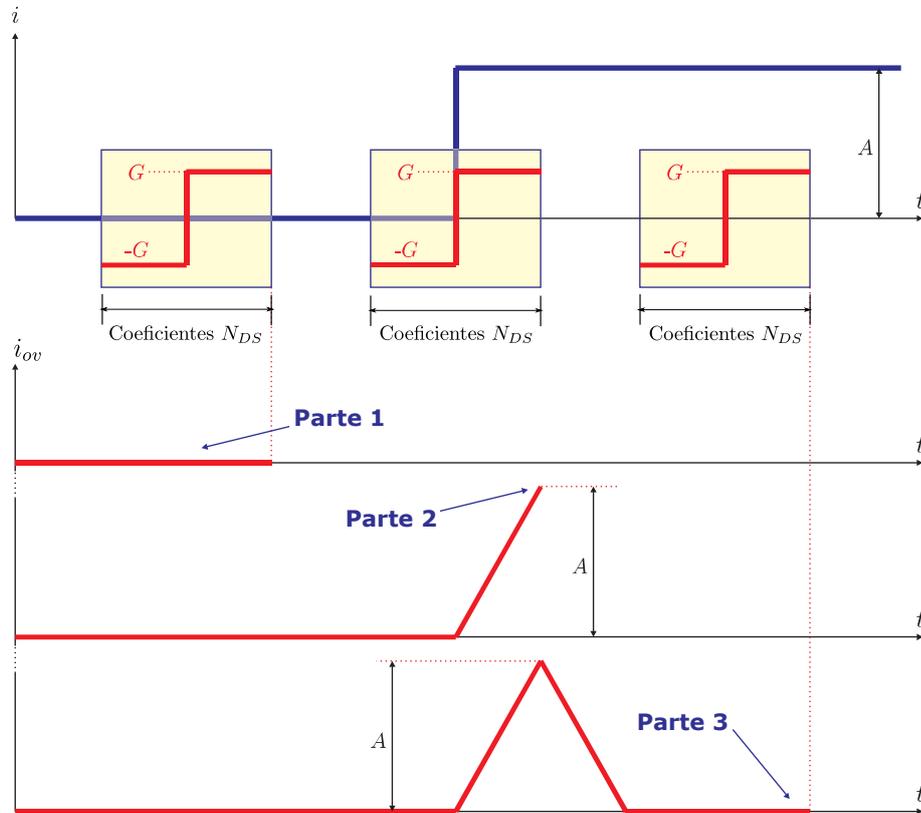
$$i_{OV} = \frac{N_{DS} - 1}{2} \cdot (-G \cdot 0) + \frac{N_{DS} - 1}{2} \cdot (G \cdot 0) = 0, \quad (3.1)$$

parte 2:

$$i_{OV} = \frac{N_{DS} - 1}{2} \cdot (-G \cdot 0) + \frac{N_{DS} - 1}{2} \cdot (G \cdot A) = \frac{N_{DS} - 1}{2} \cdot (G \cdot A), \quad (3.2)$$

parte 3:

$$i_{OV} = \frac{N_{DS} - 1}{2} \cdot (-G \cdot A) + \frac{N_{DS} - 1}{2} \cdot (G \cdot A) = 0. \quad (3.3)$$



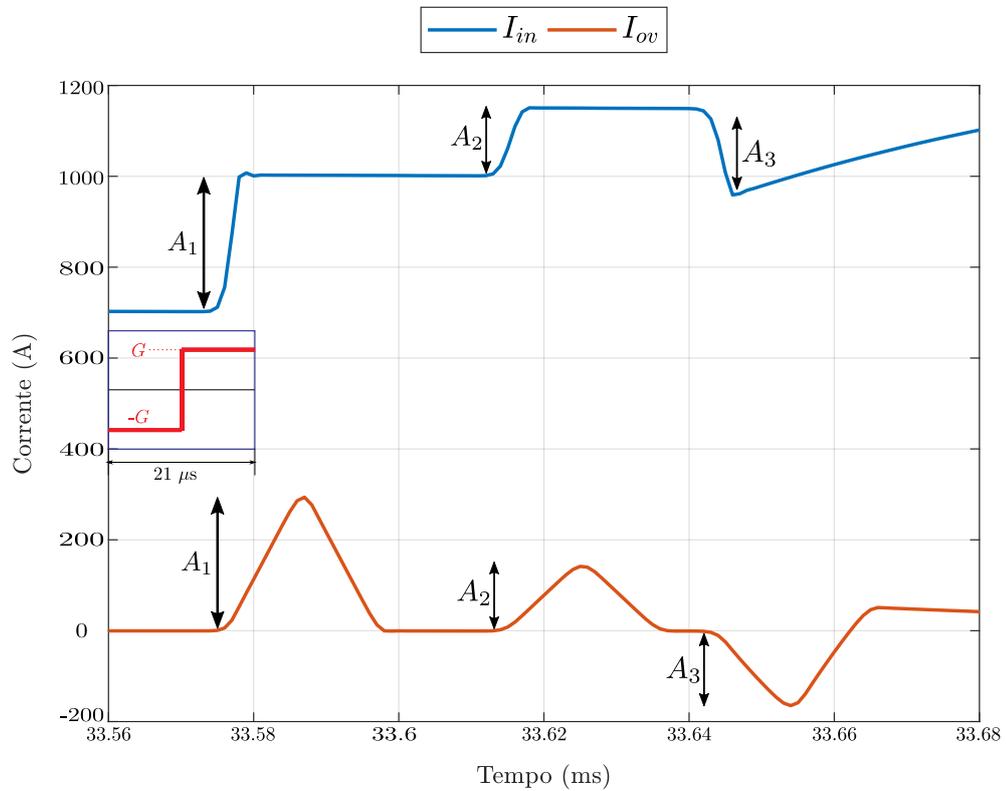
**Figura 3.1.** Valor de  $G$  para obtenção de ganho unitário (LOPES *et al.*, 2019).

Observando as equações, a Figura 3.1 e sabendo que é necessário o ganho unitário, ou seja,

que na parte 2 tenha-se  $i_{OV} = A$ , uma vez que  $A$  é a amplitude do degrau de entrada, nota-se que o ganho deve ser:

$$G = \frac{2}{N_{DS} - 1}. \quad (3.4)$$

A Figura 3.2 mostra um exemplo da aplicação do filtro DS em um sinal de corrente e a relação entre as amplitudes do sinal de entrada e de saída. Percebe-se que, de fato, a saída do filtro DS mantém a amplitude e polaridade das variações observadas em sua entrada.



**Figura 3.2.** Aplicação do filtro DS.

A duração da janela de coeficientes ( $T_{DS}$ ) é representada em termos de tempo e o número de coeficientes ( $N_{DS}$ ) é obtido conforme (3.5):

$$N_{DS} = \frac{T_{DS}}{\Delta t}, \quad (3.5)$$

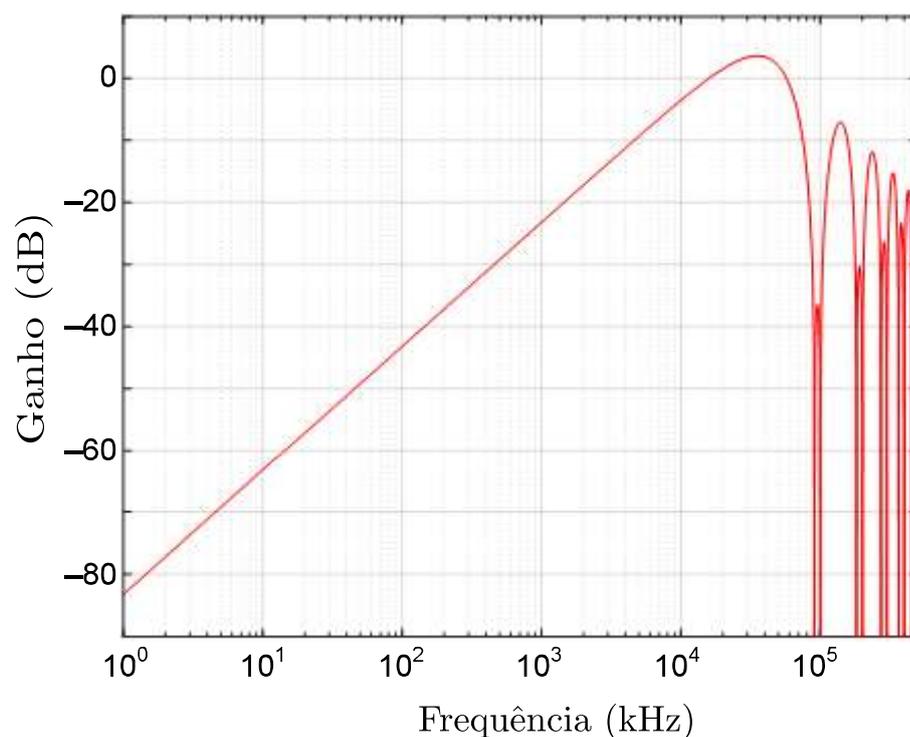
onde  $\Delta t$  é o período de amostragem do sinal, sendo calculada da seguinte maneira (LOPES *et al.*, 2019):

$$\Delta t = \frac{1}{F_s}. \quad (3.6)$$

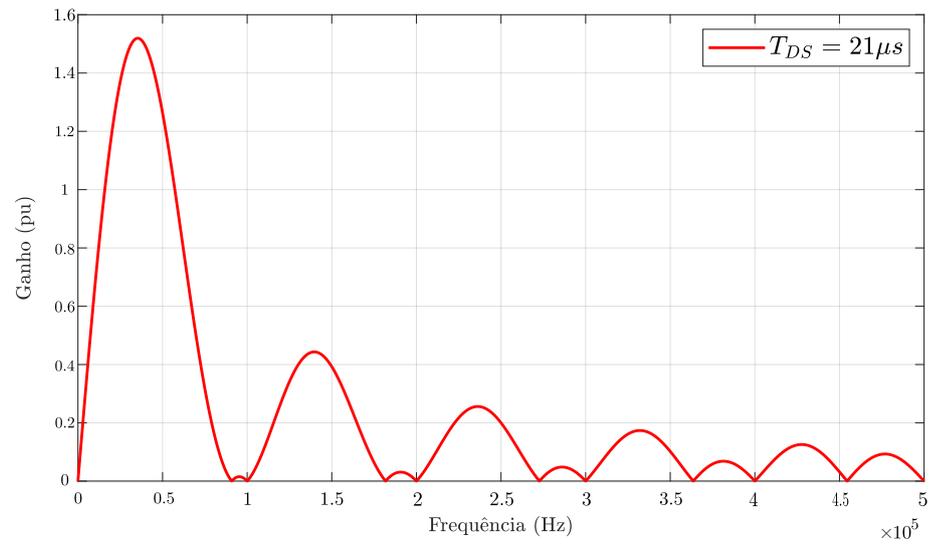
### 3.1.2 Resposta na Frequência

A resposta do filtro DS quando plotada na frequência é de grande relevância. Nessa resposta, a janela de coeficientes ( $T_{DS}$ ) também influencia a saída, como será observado durante a validação do filtro no presente trabalho. O estudo na frequência é necessário para saber como se comportará o filtro com relação à atenuação do sinal em altas frequências e na frequência fundamental (60 Hz), uma vez que é importante que o sinal tenha ganho suficiente para ser percebido na saída filtro (LOPES *et al.*, 2019).

Nas Figuras 3.3 e 3.4 pode-se observar a resposta em frequência do filtro para as configurações padrão adotadas pelo fabricante, sendo a primeira imagem dada com ganho em decibéis (dB) (formato que o fabricante apresenta em Guzmán *et al.* (2017)) e escala logarítmica nos dois eixos, a segunda, com ganho em p.u. e a frequência em Hz.



**Figura 3.3.** Resposta em frequência com escala logarítmica e ganho em decibéis (GUZMÁN *et al.*, 2017).



**Figura 3.4.** Resposta em frequência com ganho em p.u..

## CAPÍTULO 4

# DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS AVALIADOS

Neste capítulo, serão introduzidos os parâmetros avaliados para poder validar o filtro. Após a validação, o modelo computacional será aplicado em seis diferentes modelagens de linhas de transmissão para fins de estudos de sua resposta frente aos diversos transitórios característicos aos sistemas associados.

### 4.1 MODELAGEM DO FILTRO DS

A validação do modelo proposto para o filtro DS decorre da análise das variações de certas configurações e a interferência destas nas respostas no tempo e na frequência do filtro. Neste trabalho, serão variadas a duração da janela de coeficientes  $T_{DS}$  e, conseqüentemente, seu tamanho  $N_{DS}$ , frequência de amostragem  $F_s$  e, por conseguinte, o número de pontos analisados para avaliar o impacto destas mudanças nos sinais de saída e na precisão na detecção de OV's. Para tanto, essas primeiras análises serão realizadas com a resposta do filtro no domínio do tempo. Posteriormente, haverá a validação da resposta em frequência dos filtros com diferentes ajustes implementados e a comparação da resposta do modelo escolhido com a resposta do relé real para verificação do erro, possibilitando saber a exatidão do modelo de filtro implementado.

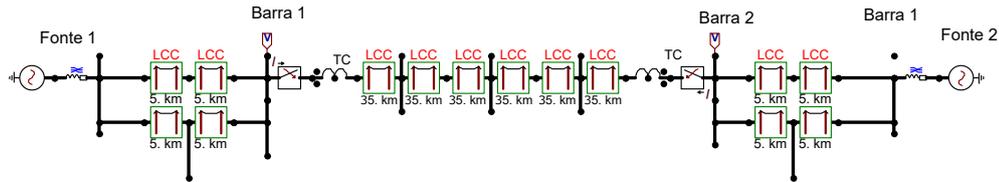
#### 4.1.1 Sistema Analisado

O sistema elétrico de potência utilizado para geração dos transitórios de falta lançados no ponto de defeito foi modelado no ATP como LT idealmente transposta modelada segundo método de Bergeron. A LT é de 230 kV possui 210 km composta por blocos LCC e a falta simulada foi AT com um ângulo de incidência de  $90^\circ$ , considerando o sinal com referência senoidal. A Figura 4.1 ilustra o sistema utilizado para as simulações contabilizadas. A reatância e resistência utilizadas são apresentadas na Tabela 4.1 e foram obtidas rodando a rotina *Line*

*Constants* (LCC) do ATP.

**Tabela 4.1.** Parâmetros da linha.

Sequência	Resistência ( $\frac{\Omega}{km}$ )	Reatância ( $\frac{\Omega}{km}$ )
Zero	0,46119	1,53476
Positiva	$9,2721 \cdot 10^{-2}$	0,51982

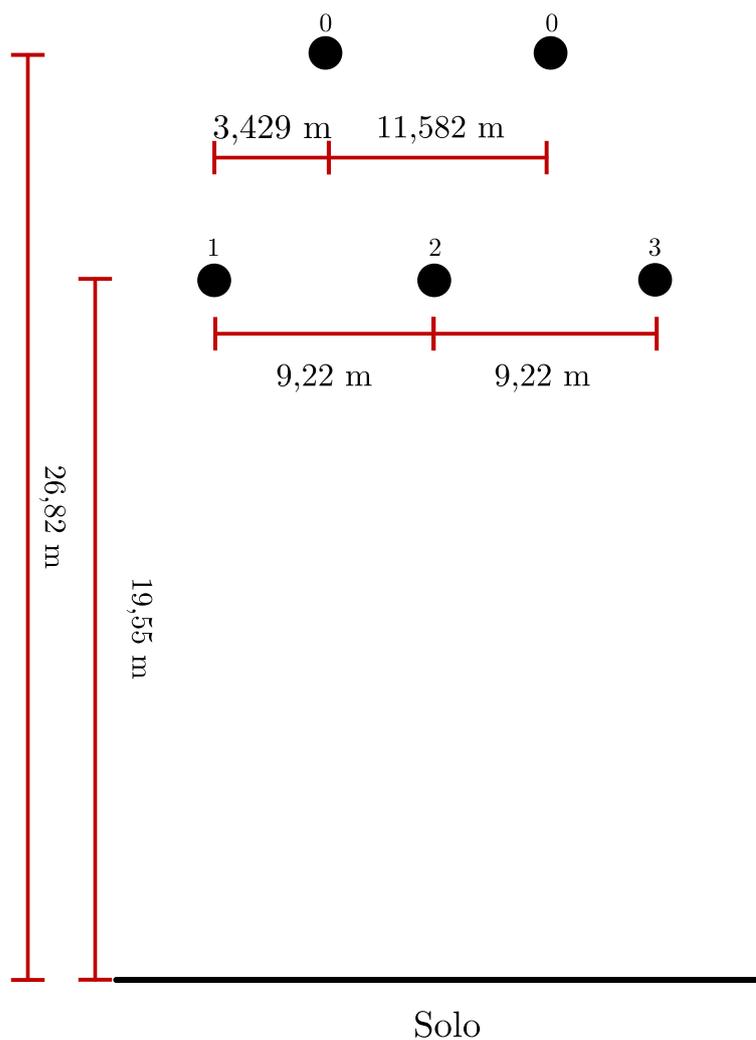


**Figura 4.1.** Representação do modelo de LT avaliada.

O LCC é uma rotina auxiliar do ATP para cálculo de parâmetros de linhas de transmissão de uma configuração arbitrária de cabos (CLAUE, 1994). Portanto, a topologia de torre considerada para LT modelada é apresentada da Figura 4.2, em que as fases são representadas pela numeração não nula, os cabos guarda pelo número zero e as distâncias encontram-se em metros. Quanto ao tipo de falta, esse é controlado pelas resistências entre as fases e entre cada fase e a terra, de modo que a partir dos valores escolhidos em cada uma dessas resistências se administra o tipo de falta.

A frequência de amostragem  $F_s$  foi modificada alterando-se o passo de integração direto no programa ATP, assumindo que os sinais do ATP já seriam os sinais digitalizados. Para tanto, utilizaram-se os valores de  $1\mu s$  e  $0,1\mu s$ , resultando em  $F_s = 1$  MHz e  $F_s = 10$  MHz, respectivamente. Ao mudar o passo de integração, muda-se também a quantidade de pontos que serão analisados. Outra maneira de alterar o total de pontos é utilizando *TIMESTEP MIN* ao se escrever a MODELS. Por fim, o número de coeficientes da janela do filtro  $N_{DS}$  foi alterado diretamente no código de implementação do filtro, utilizando-se quatro valores diferentes (11, 21, 161 e 321) para o tamanho da janela.

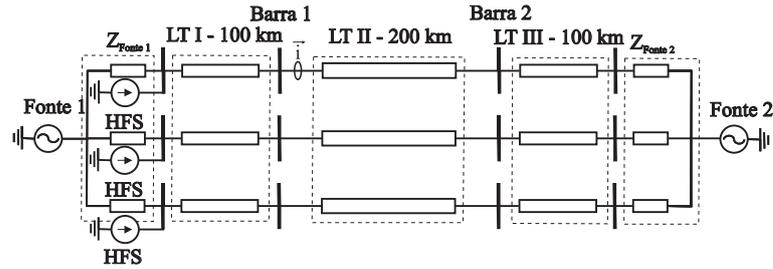
A última análise necessária para validação do modelo proposto consiste na análise da resposta transitória durante faltas, utilizando nesse sistema fontes harmônicas e verificando a resposta do modelo implementado com a do relé real (relé SEL-T400L). Esse estudo foi iniciado em Ribeiro *et al.* (2019) em que foram comparados 21 pontos, sendo eles zeros e picos do sinal apenas.



**Figura 4.2.** Configuração da torre típica da LT avaliada.

Com o intuito de confirmar a validação feita no artigo, neste trabalho outros pontos serão comparados. Para isso, será utilizado o mesmo sistema usado em Ribeiro *et al.* (2019). Trata-se de um sistema de 230 kV/60 Hz, composto por três LTs modeladas a parâmetros distribuídos, constantes na frequência, com duas LTs adjacentes com 100 km de comprimento cada e uma central com 200 km. A fonte harmônica (HFS) foi configurada para operar como fonte de corrente com amplitude de 10 A, sendo utilizada a mesma configuração para todos os testes, mudando-se apenas os valores das frequências harmônicas injetadas no sistemas (RIBEIRO *et al.*, 2019).

A Figura 4.3 representa esse sistema e os valores parametrizados de resistência, indutância e capacitância da linha são descritos na Tabela 4.2.



**Figura 4.3.** Representação do modelo de LT usada para validação da resposta transitória (RIBEIRO *et al.*, 2019).

**Tabela 4.2.** Parâmetros da linha (RIBEIRO *et al.*, 2019).

Elemento	R ( $\frac{\Omega}{km}$ )	L ( $\frac{mH}{km}$ )	C ( $\frac{nF}{km}$ )
LT I, II e III	0,098	1,405	0,04313

## 4.2 SISTEMAS BERGERON E J. MARTI

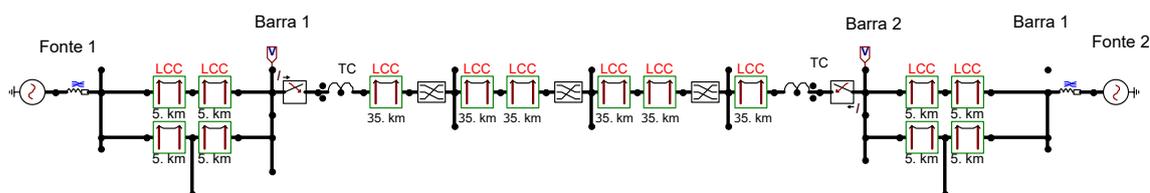
As técnicas de modelagem para sistemas de transmissão de energia elétrica com os métodos de Bergeron e J. Marti foram utilizadas para analisar e comparar o impacto que diferentes modelos de linha apresentam para detecção de OV. Utilizaram-se três sistemas de Bergeron e três de J. Marti para modelar linhas idealmente transpostas, não transpostas e transpostas. Quanto à transposição de linhas, alternam-se as fases de tal modo que ao final a posição das fases deve ser a mesma do começo da representação da linha e cada trecho de distribuição de fases deve percorrer a mesma distância que os adjacentes.

A transposição da linha é realizada como forma de restabelecer o equilíbrio nos terminais da LT. Um desequilíbrio em termos de tensão e corrente em frequência fundamental considerável pode existir quanto maior for o comprimento da linha. Essa diferença nos sinais entre os extremos da linha se dá pelas características físicas e elétricas dos condutores (FLORES, 2006).

As mesmas configurações de tamanho de linha e tipo de falta usadas no sistema modelado para o estudo da validação do filtro DS, foram adotadas para os sistemas dessa avaliação, inclusive o sistema de Bergeron idealmente transposto descrito na seção anterior é o mesmo que aqui será avaliado. Os valores de parâmetros de todas as LTs utilizadas nessa seção são os mesmos descritos na Tabela 4.1 e a configuração da torre se mantém igual a da Figura 4.2. Todos esses sistemas foram modelados no *software* ATP. A modelagem de linha idealmente transposta

é realizada matematicamente pelo próprio *software* e a representação pode ser observada na Figura 4.1.

Quando se trata da linha não transposta, a aparência física da linha é a mesma que a da idealmente transposta, uma vez que a transposição não é notada visualmente, fato que difere da configuração da linha transposta. Para esta última, a transposição é realizada de forma manual utilizando blocos de transposição de linhas na modelagem em ATP. Para a simulação da linha transposta, utilizaram-se três blocos de transposição. Dessa forma, a linha possui quatro trechos de  $\frac{1}{6}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{3}$  e  $\frac{1}{6}$  do comprimento total da linha, respectivamente, ou seja, trechos de 35 km, 70 km, 70 km e 35 km. Com isso, cada fase ocupa a mesma posição por um trecho de 70 km. Como sistema trifásico, cada fase ocupa uma distância de  $\frac{1}{3}$  do tamanho total da linha. O sistema utilizado para simulação da LT transposta é ilustrado na Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Representação do modelo de LT transposta.

O estudo de diferentes modelos de linhas se faz importante neste trabalho, uma vez que, cada um desses modelos resultam em diferentes transitórios e, conseqüentemente, em diferentes respostas do filtro DS, tal como explicitado no próximo capítulo.

# ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados das implementações do filtro DS perante as variações dos parâmetros mencionados no capítulo anterior.

## 5.1 VALIDAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Considerando como ponto de partida o artigo Ribeiro *et al.* (2019), outros 22 casos foram simulados via função *playback* no relé SEL-T400L, a qual utiliza o sinal gerado na simulação do filtro DS - o sinal do primário do transformador de corrente (TC) - no relé, para este simular a atuação sobre o sinal. Com isso, foi mapeada a resposta em frequência do filtro DS presente no relé e comparada com a resposta em frequência do filtro implementada neste trabalho.

Para cada caso, a parcela de regime permanente dos sinais de entrada e saída do filtro DS foi extraída e aplicada à FFT (*Fast Fourier Transform*). Desta forma, foi possível a representação do espectro de amplitude na frequência para cada sinal de entrada (RIBEIRO *et al.*, 2019). Este processo é ilustrado na Figura 5.1, para o caso em que a frequência inter-harmônica simulada foi de 35350 Hz.

Como Ribeiro *et al.* (2019) avaliaram regiões nas quais o ganho atinge picos e valores aproximadamente nulos, no presente estudo, as frequências escolhidas para análise foram valores intermediários entre os picos e zeros para conseguir maior solidez na validação. O resultado do mapeamento da resposta com os 43 casos analisados está representado na Figura 5.2 e na Tabela 5.1, na qual os erros percentuais são calculados como a razão do desvio absoluto entre o filtro real e o implementado pelo ganho verificado no filtro real.

Analisando os resultados encontrados em relação aos ganhos e erros, nota-se que o filtro implementado em MODELS/ATP possui resposta em frequência muito similar à obtida no filtro DS presente no relé. Como os erros são da ordem de  $10^{-4}$  % ou menores, estes podem ser

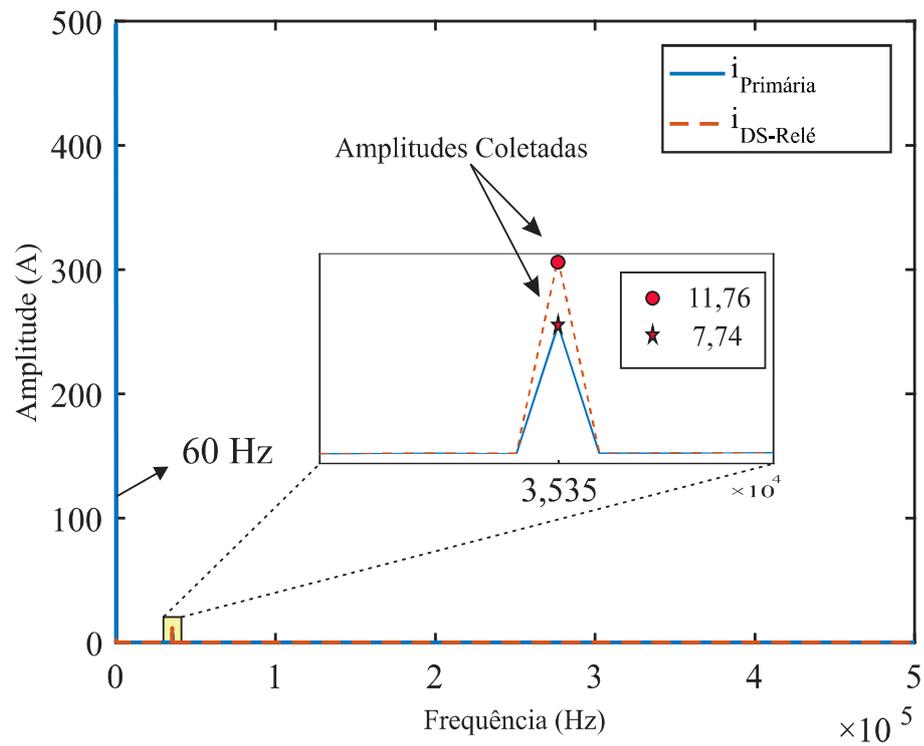


Figura 5.1. Espectro de frequência para o caso de 35350 Hz (RIBEIRO *et al.*, 2019).

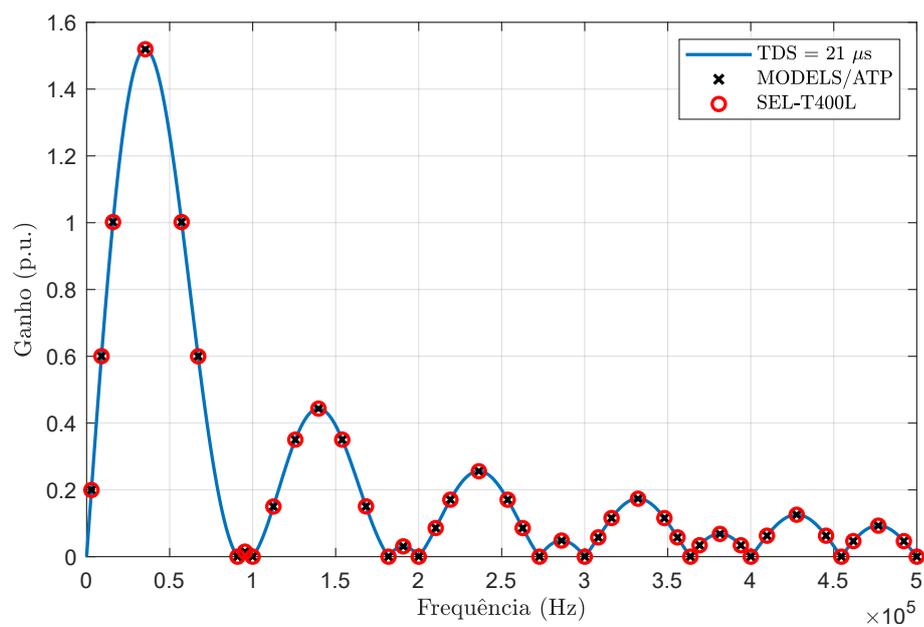


Figura 5.2. Mapeamento da resposta em frequência do filtro DS do relé SEL-T400L sobreposta com a resposta do filtro DS modelado.

**Tabela 5.1.** Relação Frequência X Ganho para filtro DS real e modelado.

Frequência (kHz)	Ganho (MODELS/ATP)	Ganho (SEL-T400L)	Erro (%)
2,9	0,1998243	0,1996325	$9,61 \cdot 10^{-4}$
8,95	0,6004498	0,6004136	$6,02 \cdot 10^{-5}$
15,9	1,0019775	1,0019737	$3,75 \cdot 10^{-6}$
35,35	1,5192574	1,5193898	$8,06 \cdot 10^{-5}$
57,20	1.0018710	1.0018649	$6,12 \cdot 10^{-6}$
67,15	0.6000084	0.5999924	$2,66 \cdot 10^{-5}$
90,9	Nulo	Nulo	0
95,35	0,0150813	0,015082	$1,99 \cdot 10^{-5}$
100	Nulo	Nulo	0
112,5	0,1501042	0,1501030	$8,05 \cdot 10^{-6}$
125,7	0,3503796	0,3503828	$9,13 \cdot 10^{-6}$
139,65	0,443283	0,4432251	$1,29 \cdot 10^{-4}$
153,95	0,3503787	0,3503635	$4,32 \cdot 10^{-5}$
168,25	0,1505596	0,1505606	$6,41 \cdot 10^{-6}$
181,8	Nulo	Nulo	0
190,7	0,0308651	0,0308615	$1,17 \cdot 10^{-4}$
200	Nulo	Nulo	0
210,25	0,0858272	0,0858256	$1,91 \cdot 10^{-5}$
219,10	0,1707412	0,1707443	$1,78 \cdot 10^{-5}$
236,25	0,25589	0,2558172	$2,79 \cdot 10^{-4}$
253,60	0,1706142	0,1706096	$2,69 \cdot 10^{-5}$
262,65	0,0856629	0,0856632	$3,39 \cdot 10^{-6}$
272,75	Nulo	Nulo	0
286,05	0,0481910	0,0481852	$1,22 \cdot 10^{-4}$
300	Nulo	Nulo	0
308,15	0,0578263	0,0578261	$4,77 \cdot 10^{-6}$
316,15	0,1157048	0,1157065	$1,52 \cdot 10^{-5}$
332,1	0,1735997	0,1735339	$3,79 \cdot 10^{-4}$
348	0,1156211	0,11561629	$4,15 \cdot 10^{-5}$
355,90	0,0577468	0,0577464	$6,54 \cdot 10^{-6}$
363,65	Nulo	Nulo	0
369,20	0,0343298	0,0343315	$4,81 \cdot 10^{-5}$
381,45	0,0682356	0,068220	$2,40 \cdot 10^{-4}$
394,05	0,0341324	0,0341320	$1,14 \cdot 10^{-5}$
400	Nulo	Nulo	0
409,75	0,0627916	0,0627926	$1,56 \cdot 10^{-5}$
427,65	0,1255794	0,1255717	$6,20 \cdot 10^{-5}$
445,35	0,0627464	0,0627463	$2,21 \cdot 10^{-6}$
454,55	Nulo	Nulo	0
461,80	0,0465728	0,0465754	$5,61 \cdot 10^{-5}$
476,85	0,0928845	0,0928645	$2,16 \cdot 10^{-4}$
492,25	0,04650962	0,04650960	$4,19 \cdot 10^{-7}$
500	Nulo	Nulo	0

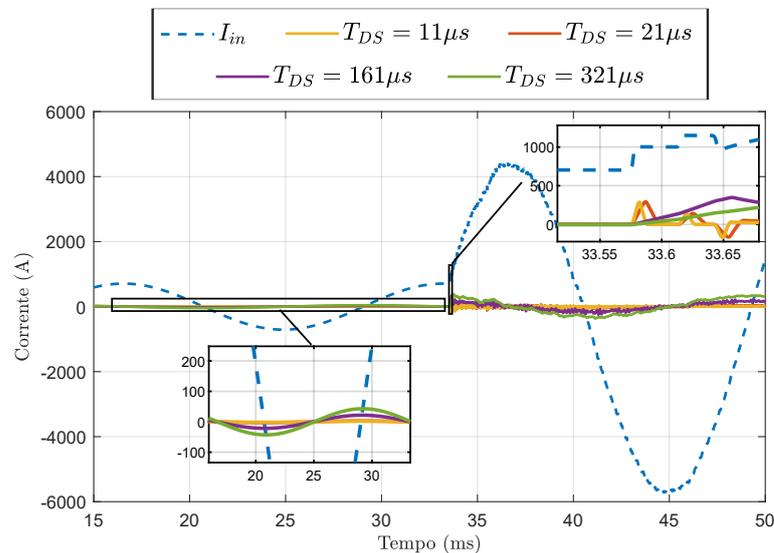
desprezados e conclui-se que o filtro modelado possui alta acurácia para respostas em frequência.

## 5.2 VARIAÇÃO DA JANELA DE COEFICIENTES

Esta seção tem o intuito de analisar o impacto que a duração da janela de coeficientes  $T_{DS}$  tem sobre a resposta do filtro no domínio do tempo e da frequência e a precisão na detecção das OV's lançadas na LT a partir do ponto de falta.

### 5.2.1 Domínio do Tempo

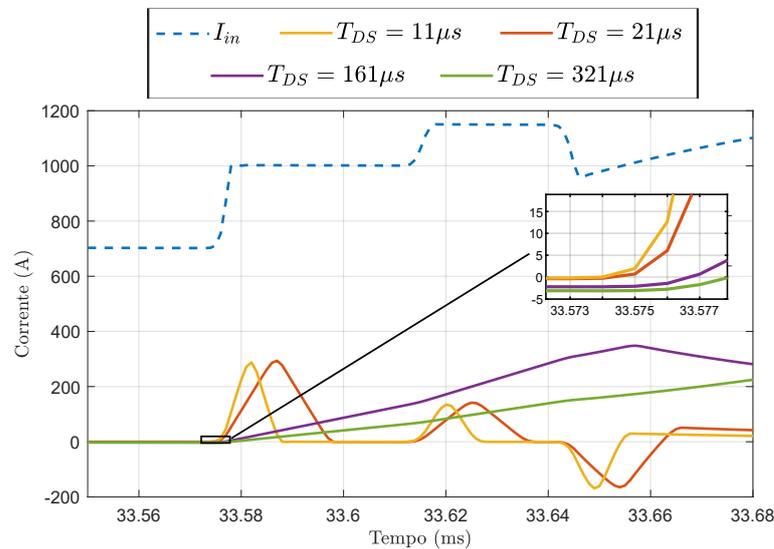
Utilizaram-se quatro valores diferentes de  $T_{DS}$  para realizar este estudo, sendo eles:  $11 \mu s$ ,  $21 \mu s$ ,  $161 \mu s$  e  $321 \mu s$ . Como o  $\Delta t$  é calculado conforme (3.6), e nesta seção do trabalho empregou-se  $F_s = 1 \text{ MHz}$ , com  $\Delta t = 1 \mu s$ , de acordo com (3.5). Dessa forma, os valores de  $N_{DS}$  foram 11, 21, 161 e 321 coeficientes, os quais foram considerados utilizando o modelo de filtro com amostra central nula. A Figura 5.3 ilustra o sinal de entrada e as saídas do filtro antes e depois do instante de falta.



**Figura 5.3.** Sinais de pré falta e no momento da falta.

A melhor visualização das respostas do filtro DS para cada situação se dá na Figura 5.4, a qual representa os sinais de saída referentes a cada um dos diferentes coeficientes utilizados, esta figura ilustra o mesmo sinal da Figura 5.3, porém com *zoom* a partir do momento que a falta é detectada. É possível observar pela Figura 5.4 que o  $T_{DS}$  possui um efeito sobre a

forma do sinal de saída, uma vez que o comprimento do sinal triangular depende do valor dos coeficientes da janela. Dessa forma, para valores elevados, será necessário um maior tempo para o alinhamento da amostra central da janela com a subida do degrau. Com isso, as variações da OV original podem se sobrepor na saída do filtro, comprometendo a interpretação dos transitórios. Todavia,  $T_{DS}$  muito reduzidos podem aumentar a sensibilidade gerando mais ruídos no sinal (SEL, 2017). Pela figura, para os valores de  $11\ \mu s$  e  $21\ \mu s$  todas as frentes de ondas são passíveis de identificação no sinal de saída, enquanto que os coeficientes de  $161\ \mu s$  e  $321\ \mu s$  na ocorrência do segundo degrau do sinal de entrada já não é possível identificar a segunda OV devido à sobreposição que ocorre em decorrência da largura da onda triangular, sendo inviável quantificar quantas OVs incidiram naquele período.

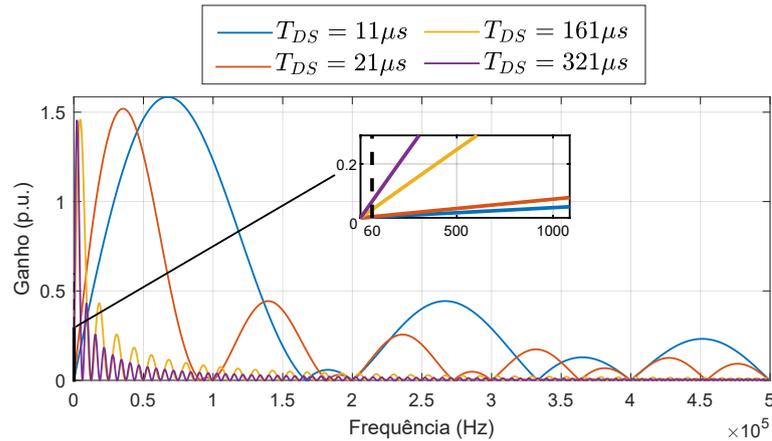


**Figura 5.4.** Impacto do  $T_{DS}$  sobre a saída do filtro DS.

### 5.2.2 Domínio do Frequência

Os mesmos valores de  $T_{DS}$  foram utilizados aqui para verificar a influência que o tamanho da janela tem sobre a resposta do filtro em frequência, uma vez que se deve ter a atenção de observar a atenuação do sinal nas diversas frequências. Como a frequência de amostragem ( $F_s$ ) utilizada também foi de 1 MHz, as respostas aqui são representadas até 500 kHz, respeitando-se, assim, o critério de Nyquist.

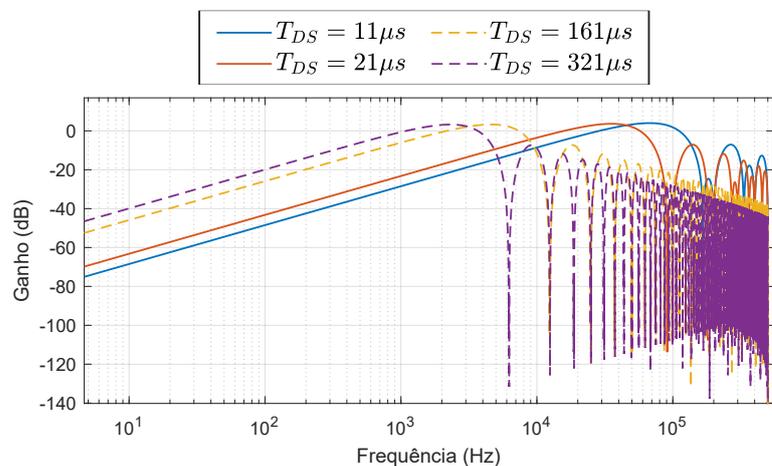
Observa-se na Figura 5.5, que janelas maiores apresentam uma grande atenuação nas frequências mais altas, ou seja, o ganho dos sinais na resposta do filtro para valores altos



**Figura 5.5.** Impacto do  $T_{DS}$  sobre a resposta em frequência do filtro DS.

de  $T_{DS}$  são baixos, o que é compatível com a análise feita para esses valores na resposta no tempo, em que para transitórios rápidos a avaliação destes se mostrou impossibilitada. Por outro lado, nos valores mais baixos de  $11 \mu s$  e  $21 \mu s$ , em frequências mais altas existem faixas as quais possuem ganho suficientemente elevado para passagem do sinal na resposta do filtro. Essa análise é facilitada pela Figura 5.5, na qual pode-se perceber, também, pela ampliação realizada, que na frequência fundamental (60 Hz) a atenuação para valores menores de  $T_{DS}$  é maior e, para valores mais altos, o ganho é maior.

Outra forma plausível de analisar a saída em frequência do filtro é utilizando o ganho em dB e escala logarítmica. O resultado está apresentado na Figura 5.6. Comparado-a com a Figura 3.3, a qual é proveniente do artigo da SEL, nota-se que o modelo computacional de filtro aqui proposto apresenta formato semelhante. Com essa representação também pode-se perceber melhor o ganho do filtro na frequência fundamental.



**Figura 5.6.** Resposta em frequência com escala logarítmica e ganho em dB.

Conforme apresentado nas Figuras 5.5 e 5.6, o ganho na frequência fundamental é diretamente proporcional à duração da janela de dados utilizada. Dessa forma, justificam-se os diferentes valores iniciais observados na saída do filtro para os instantes anteriores à incidência do distúrbio ao terminal monitorado, conforme evidenciado na Figura 5.4.

Essas análises com o intuito de viabilizar uma boa percepção das OV's incidentes nos terminais são importantes para uma localização de faltas mais precisa e para o uso de sistemas de proteção, principalmente para ondas mais atenuadas (LOPES *et al.*, 2019; LOPES *et al.*, 2018). Caso o sinal triangular de saída do filtro DS seja sobreposto por alguma componente fundamental e o pico da saída do filtro estiver dentro de um vale do sinal da frequência fundamental, a detecção dessa frente de onda por um esquema de *hard threshold* (limiar) é impossibilitada, porque os valores máximos da componente fundamental ultrapassarão o valor de pico da saída (SANTOSO *et al.*, 1996). A ocorrência dessa situação pode gerar problemas para detecção de OV's, por isso é indicado o uso de valores pequenos de  $T_{DS}$  (LOPES *et al.*, 2019).

### 5.3 VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

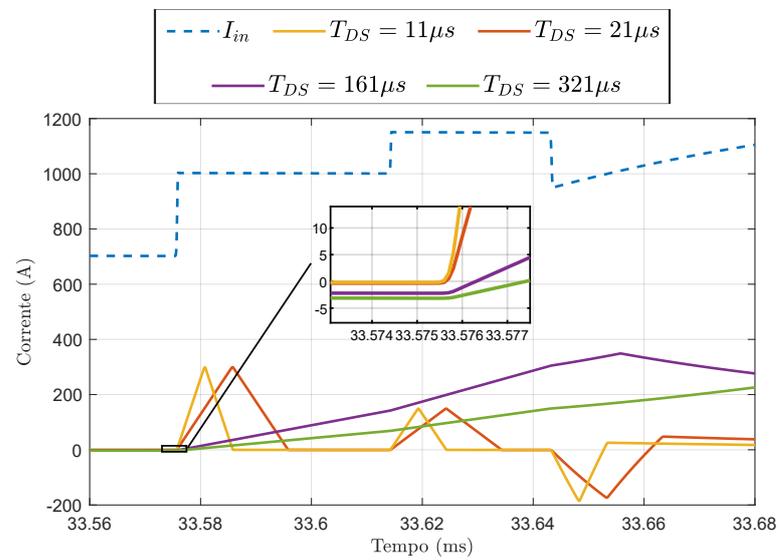
Visando verificar o impacto que a mudança da frequência de amostragem e o número de coeficientes analisados tem sobre a resposta do filtro no domínio do tempo e da frequência, dois valores de  $F_s$  serão usados.

#### 5.3.1 Domínio do Tempo

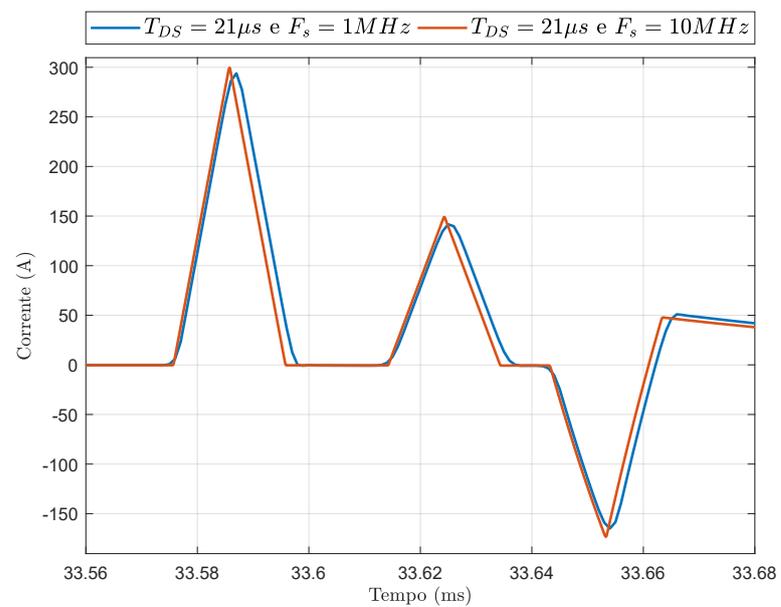
Ao mudar o passo de integração de  $1 \mu s$  para  $0,1 \mu s$ , a precisão é ampliada, uma vez que para um período existirão mais pontos avaliados. Essa precisão pode ser observada ao se comparar a Figura 5.7 com a 5.4. Como esperado, as formas de ondas são mais precisas usando um valor de  $F_s = 10 \text{ MHz}$  do que  $F_s = 1 \text{ MHz}$ .

Reduzindo-se o período de amostragem do sinal de entrada e, por consequência, o número de amostras contidas na janela de dados do filtro, constata-se que a precisão da saída do filtro irá diminuir também, o que afeta a detecção dos transitórios que atingem os terminais da LT.

Ao plotar o sinal de saída do filtro para a mesma configuração de  $T_{DS}$  variando apenas o  $F_s$ ,



**Figura 5.7.** Impacto do  $T_{DS}$  sobre a saída do filtro DS com  $F_s = 10$  MHz.



**Figura 5.8.** Comparação da saída do filtro DS com  $F_s = 1$  MHz e  $F_s = 10$  MHz.

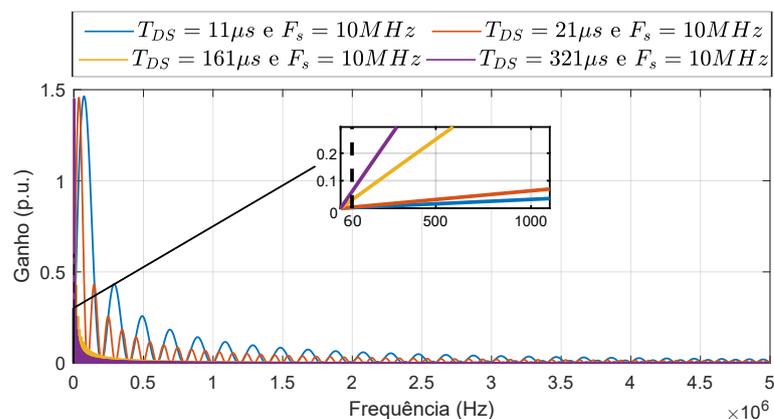
(Figura 5.8), é possível constatar melhor as diferenças causadas por cada frequência de amostragem. Apesar de mais precisa, a forma de onda não apresenta mudanças muito significativas.

### 5.3.2 Domínio da Frequência

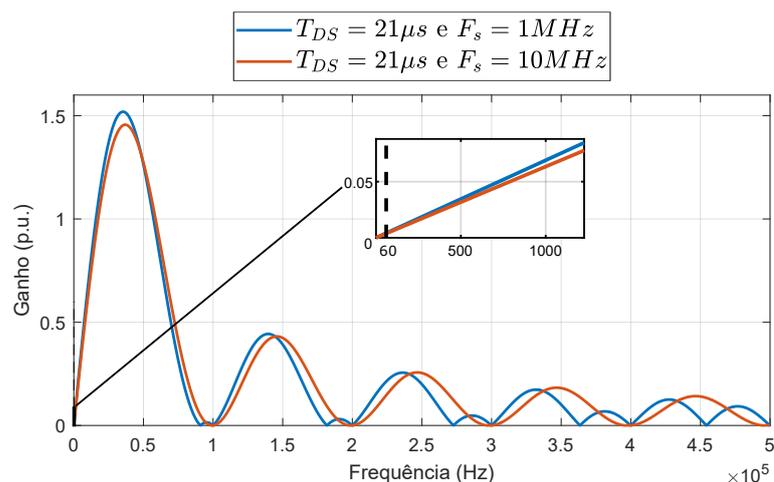
Mudando-se a frequência de amostragem é necessário mudar a escala de representação da resposta em frequência para continuar respeitando o critério de Nyquist, passando a ser retratada até 5.000 kHz, ou seja, há uma maior faixa de frequência para analisar o comportamento do sinal.

Mantidas as mesmas alterações nos valores de  $T_{DS}$ , mas agora utilizando  $F_s = 10$  MHz, conforme ilustrado na Figura 5.9, as mesmas constatações realizadas previamente sobre a influência do tamanho da janela do filtro na atenuação das frequências são mantidas. A diferença nessa análise está no efeito de uma maior  $F_s$  na atenuação dos sinais. De acordo com a Figura 5.10, ao analisar as respostas das duas frequências de amostragens diferentes na mesma escala e com o mesmo valor de janela de coeficientes, a representatividade dos pequenos lóbulos que acontecem em frequências elevadas para  $F_s = 10$  MHz, é menor, uma vez que possuem amplitudes baixas e a faixa de duração deles também é muito reduzida quando comparada com a ocorrência destes em  $F_s = 1$  MHz.

Outra diferença plausível de análise, observando o *zoom* da Figura 5.9 e principalmente a Figura 5.10, é a constatação de que na frequência fundamental (60 Hz), a resposta em frequência do relé é um pouco mais atenuada quando se trata da frequência de amostragem de 10 MHz, o que deixa a parcela passante da componente fundamental um pouco menos significativa.



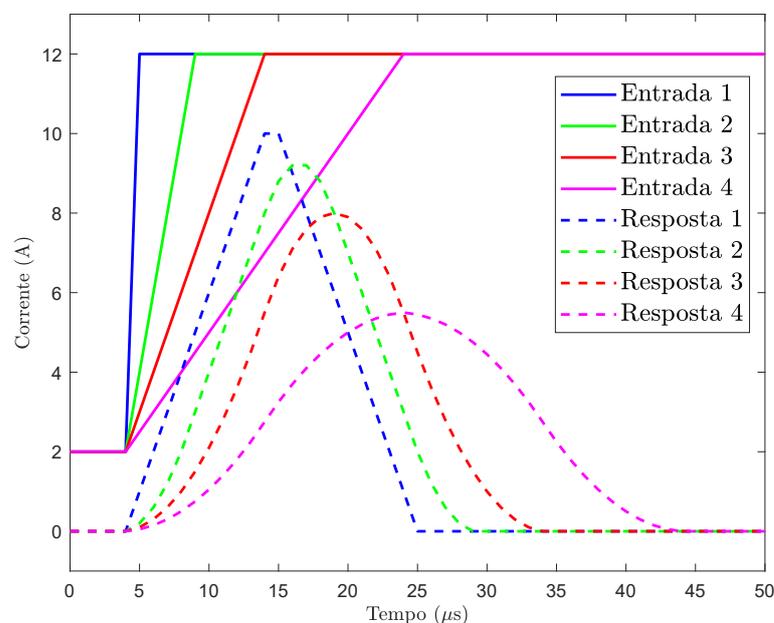
**Figura 5.9.** Impacto do  $T_{DS}$  sobre a resposta em frequência do filtro DS com  $F_s = 10$  MHz.



**Figura 5.10.** Comparação da saída do filtro DS em frequência com  $F_s = 1$  MHz e  $F_s = 10$  MHz.

## 5.4 ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ATENUADOS

Durante a propagação de uma OV pela LT, é sabido que a onda pode ser atenuada, chegando ao terminal monitorado com a forma de rampa e não de um degrau. A taxa de variação da rampa entre seu valor inicial e final depende da proporção em que o sinal foi atenuado. Assim, é importante conhecer o impacto dessa atenuação sobre a forma da resposta do filtro. A Figura 5.11 apresenta a resposta no tempo para sinais de entrada com diferentes atenuações.



**Figura 5.11.** Respostas do filtro DS para transitórios com diferentes atenuações.

A entrada 1 varia muito rapidamente, o que pode ser considerada como um degrau e com isso tem saída triangular típica da resposta do filtro DS, conforme apresentado na Figura

5.11. As outras entradas possuem a forma de rampas, dessa forma as saídas tomam a forma de parábolas, sendo que quanto menores as taxas de variação da entrada, mais espalhadas tornam-se as parábolas de saída, e o valor de cada pico da saída não corresponde mais com a amplitude de entrada, perdendo-se, assim, o ganho unitário. Assim sendo, pode-se comprometer uma boa detecção de OVs, visto que erros significativos ao estimar amplitude e tempo de chegada da OV ao terminal tornam-se comuns, sendo conhecidos como efeitos de atenuação e dispersão.

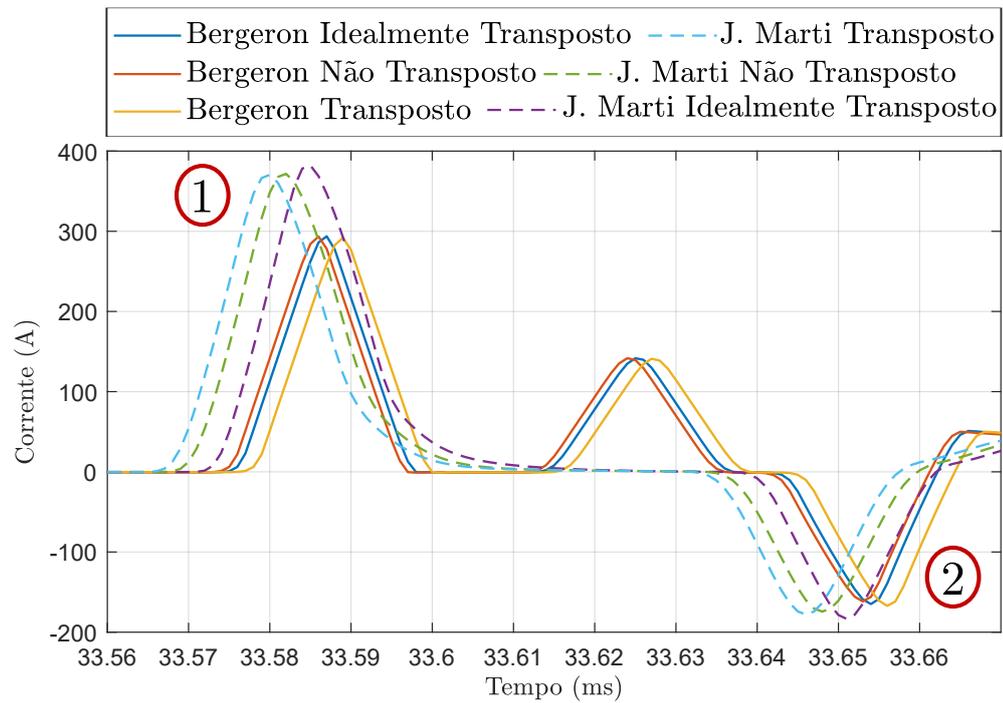
## 5.5 APLICAÇÃO DO FILTRO DS EM DIFERENTES MODELAGENS DE LINHAS

Com a validação do modelo de filtro DS presente no relé SEL-T400L, a verificação do comportamento de sua resposta para diferentes sistemas se mostra também importante. Neste estudo, as configurações do filtro não foram modificadas, sendo utilizadas as configurações padrão do relé SEL-T400L para todos os casos, ou seja, todas as simulações foram realizadas com  $T_{DS} = 21 \mu s$ , passo de integração de  $1 \mu s$  e conseqüentemente  $F_s = 1 \text{ MHz}$ .

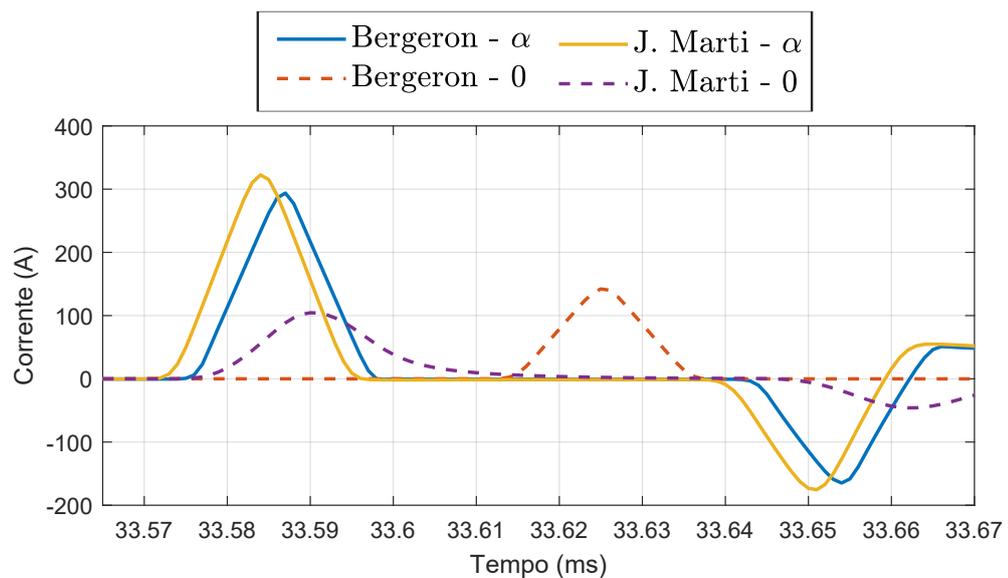
### 5.5.1 Terminal Local

A resposta para cada um dos seis sistemas pode ser observada na Figura 5.12. O terminal utilizado como referência para esta primeira análise foi o local, sendo que a falta foi simulada em uma distância mais próxima deste terminal, no quilômetro 25 a partir do terminal local. Algumas constatações interessantes podem ser feitas a partir dessa figura, como por exemplo o momento da ocorrência de nenhum pico das seis ondas coincidem, nem a amplitude delas, implicações estas que resultam de ondas com tempo de propagação e velocidade diferentes. Como as linhas são modeladas de diferentes maneiras, é esperado que os transitórios resultantes de cada simulação sejam diferentes, e isso é notável na forma do sinal triangular da saída do filtro. Para as linhas modeladas segundo o modelo de Bergeron, a forma triangular é bem evidente, enquanto que para a modelagem segundo J. Marti, ocorre um decaimento da calda de descida.

A Figura 5.12 mostra, também, que entre as frentes de ondas sinalizadas como 1 e 2, existe uma frente de onda com apenas sinais referentes ao modelo de Bergeron, sendo que não



**Figura 5.12.** Resposta do filtro DS em terminal local diante de seis sistemas distintos.



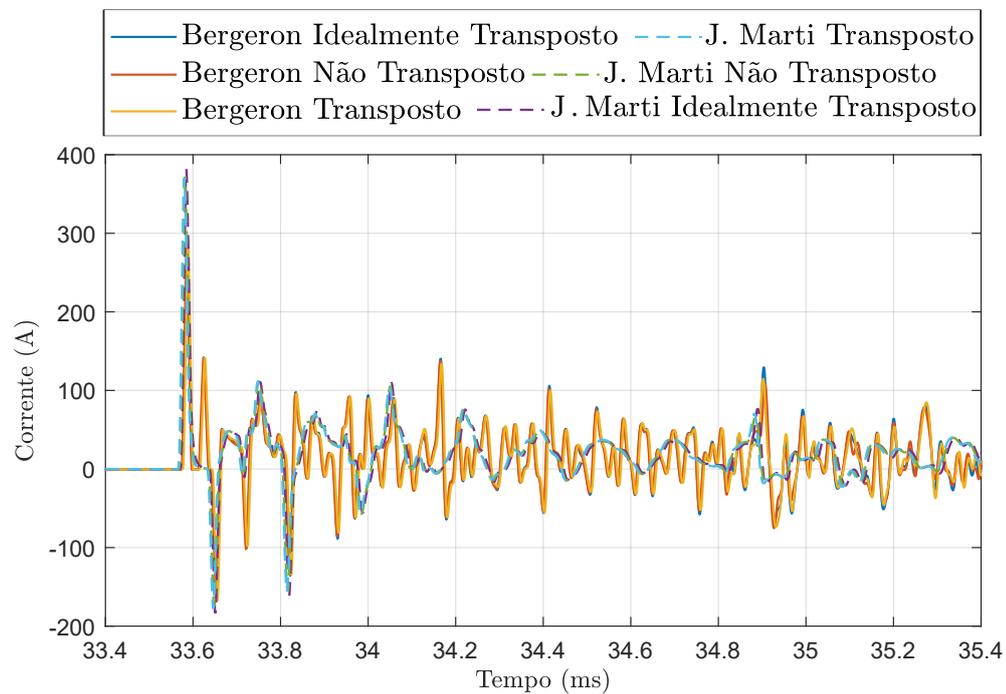
**Figura 5.13.** Resposta do filtro DS com modo  $\alpha$  e 0 desacoplados.

aparecem ondas referentes ao modelo de J. Marti. A Figura 5.13 ilustra o mesmo sinal da Figura 5.12 para os sistemas modelados segundo Bergeron e J. Marti idealmente transposto, porém desacoplados, separando suas ondas modais. Por se tratar de uma falta AT, os modos alfa e zero serão os excitados. Com a análise dos modos desacoplados, fica evidente que a segunda frente de onda observada na Figura 5.12 se deve ao modo 0 da onda referente ao sistema segundo Bergeron, uma vez que quando os modos não estão desacoplados, a primeira onda do modo  $\alpha$  e 0 estão sobrepostas no modelo segundo J. Marti, enquanto que no modelo segundo Bergeron, não.

Espera-se que os sinais para os sistemas idealmente transposto e transposto sejam os mais similares possíveis. Contudo, essa expectativa não se mostra verdadeira. Observando melhor a Figura 5.12 juntamente com a Tabela 5.2, nota-se que para os sistemas modelados segundo J. Marti o momento de pico do sinal do sistema idealmente transposto é o último, ou seja, a onda se propaga com mais lentidão, enquanto que a mais rápida é justamente o sinal do sistema transposto. Ainda considerando a análise com método J. Marti, a maior amplitude se encontra no sistema idealmente transposto, ao passo que, o não transposto e transposto apresentam amplitudes mais similares. No entanto, ao se avaliar as saídas relativas ao sistema Bergeron, o sinal com maior velocidade de propagação é o relativo ao sistema não transposto, em oposição ao transposto, que é o mais lento. O transposto também apresentou maior amplitude quando comparado ao idealmente transposto e não transposto. A amplitude dos sinais da LT idealmente transposta e não transposta varia, hora apresentando valores bem próximos e hora a magnitude maior da idealmente transposta é mais perceptível. Na Tabela 5.2 é possível verificar com maior precisão as amplitudes e tempos em que cada pico ocorre nas frentes de ondas sinalizadas na Figura 5.12 como 1 e 2.

A atenuação dos sinais J. Marti podem ser exemplificados na figura 5.14, que mostra o comportamento de todos os sistemas avaliados durante um transitório. Observa-se que o sinal tracejado, referente ao sinal J. Marti, tem uma atenuação consideravelmente alta comparada com o sinal contínuo, relacionados a Bergeron.

Como última análise, é possível notar que as LT modeladas a partir do modelo de J. Marti possuem maior velocidade de propagação das OV's e as ondas possuem maior amplitude do que as OV's das LT's de Bergeron para a simulação realizada nesta subseção.



**Figura 5.14.** Comportamento do filtro DS em terminal remoto diante de seis sistemas distintos.

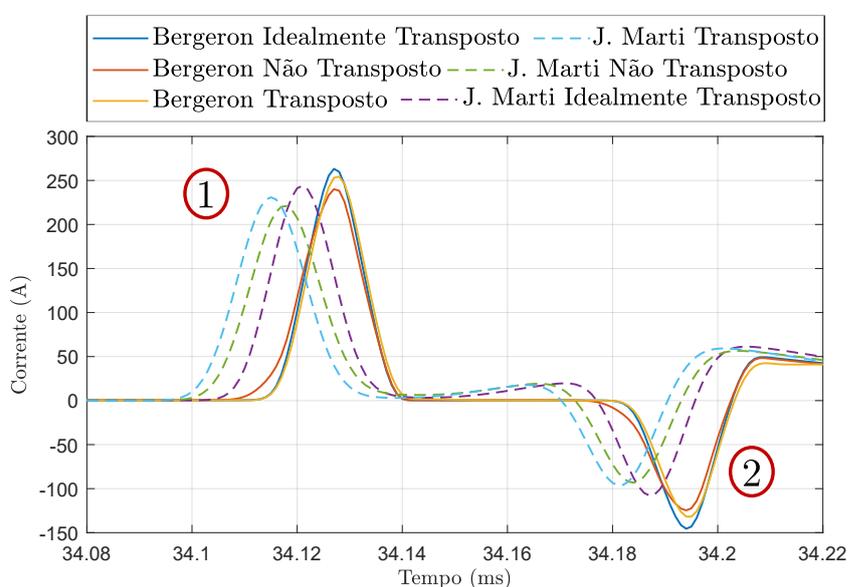
**Tabela 5.2.** Amplitude e tempo de cada sinal.

Local	Tipo de Modelagem	Tempo (ms)	Amplitude (A)
1	J. Marti Transposto	33,5800	370,3727
1	J. Marti Não Transposto	33,5820	371,6590
1	J. Marti Idealmente Transposto	33,5850	382,0787
1	Bergeron Não Transposto	33,5860	293,4052
1	Bergeron Idealmente Transposto	33,5870	293,7797
1	Bergeron Transposto	33,5890	291,8495
2	J. Marti Transposto	33,6460	-177,9818
2	J. Marti Não Transposto	33,6480	-174,3130
2	J. Marti Idealmente Transposto	33,6510	-183,3315
2	Bergeron Não Transposto	33,6530	-161,6328
2	Bergeron Idealmente Transposto	33,6540	-164,9260
2	Bergeron Transposto	33,6560	-167,1747

Como última análise, é possível notar que as LT modeladas a partir do modelo de J. Marti possuem maior velocidade de propagação das OV's e as ondas possuem maior amplitude do que as OV's das LT's de Bergeron para a simulação realizada nesta subseção.

### 5.5.2 Terminal Remoto

Um segundo estudo foi feito implementando o terminal remoto como o local de onde se dará a análise das respostas do filtro DS, contudo a localização da falta permanece a mesma da subseção anterior. As configurações do relé não são alteradas nesta seção. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.15.



**Figura 5.15.** Resposta do filtro DS em terminal remoto diante de seis sistemas distintos.

A análise da Figura 5.15 confirma que as ondas eletromagnéticas lançadas no sistema a partir do ponto de falta que utilizam o modelo de J. Marti são mais velozes, porém para o terminal remoto, as saídas do filtro para o modelo de Bergeron possuem maiores amplitudes, fato este que difere do percebido para o terminal local, confirmando a maior atenuação que ocorre para as ondas do modelo de J. Marti ao percorrerem uma maior distância. Os valores de amplitude e tempo para as posições 1 e 2 estão na Tabela 5.3.

Algumas outras mudanças são nítidas durante as avaliações singulares para cada método. Nas linhas de Bergeron, a velocidade praticamente se iguala para as três topologias, ou seja, o instante em que ocorre o pico do sinal triangular é quase o mesmo, sendo a maior alteração

**Tabela 5.3.** Amplitude e tempo de cada sinal.

Local	Tipo de Modelagem	Tempo (ms)	Amplitude (A)
1	J. Marti Transposto	34,1150	230,8781
1	J. Marti Não Transposto	34,1180	220,9760
1	J. Marti Idealmente Transposto	34,1210	243,9932
1	Bergeron Não Transposto	34,1270	240,1048
1	Bergeron Idealmente Transposto	34,1270	263,1959
1	Bergeron Transposto	34,1290	254,4093
2	J. Marti Transposto	34,1810	-96,7543
2	J. Marti Não Transposto	34,1840	-93,1970
2	J. Marti Idealmente Transposto	34,1870	-107,8352
2	Bergeron Não Transposto	34,1940	-124,6927
2	Bergeron Idealmente Transposto	34,1940	-145,5663
2	Bergeron Transposto	34,1960	-131,7168

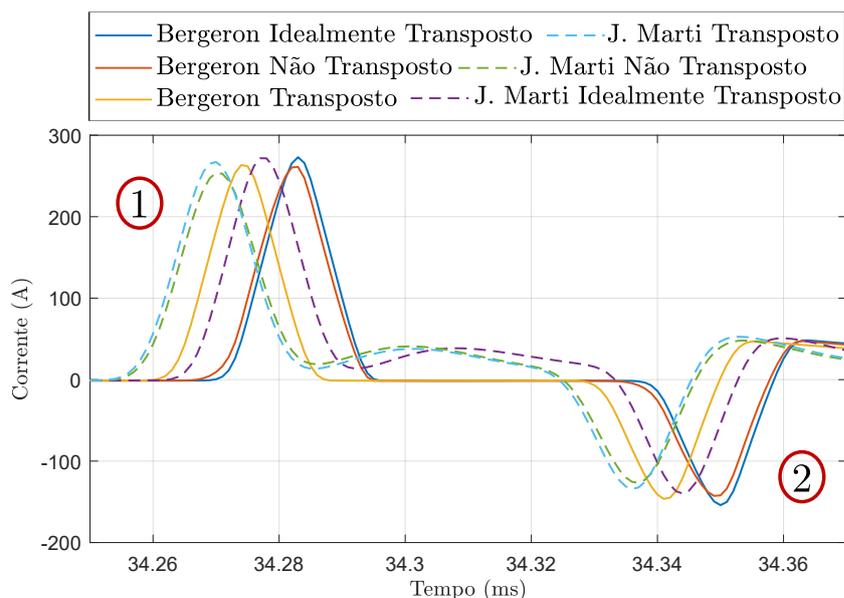
entre elas a amplitude, a qual apresenta-se maior para a idealmente transposta e menor para a não transposta. Por outro lado, para as de J. Marti, a ordem das linhas mais velozes se mantém em relação à análise realizada no terminal local e a linha idealmente transposta apresenta maior amplitude e a não transposta menor.

### 5.5.3 Posição da Falta

Com a pretensão de aprofundar o estudo das diferenças que cada tipo de sistema tem sobre os transitórios gerados a partir de faltas e a influência sobre a saída do filtro DS, variou-se o local de aplicação da falta na linha, a qual será aplicada na metade da linha monitorada (quilômetro 105). O resultado dessas alterações é mostrado na Figura 5.16.

Como a falta encontra-se no meio da linha, a análise foi realizada apenas para um terminal, o local. Com isso, algumas constatações podem ser feitas. As ondas derivadas de LTs modeladas em J. Marti são realmente mais rápidas em geral do que as em Bergeron. Percebe-se que a ordem da mais veloz para a mais lenta, em que são detectadas as frente de ondas é: J. Marti transposta > J. Marti não transposta > Bergeron Transposta > J. Marti idealmente transposta > Bergeron não transposta > Bergeron idealmente transposta.

Quando diz respeito à amplitude, algumas variações ocorrem ao serem comparadas as amplitudes das primeiras frente de ondas com as das segundas. Na primeira frente, os três sinais com



**Figura 5.16.** Resposta do filtro DS em terminal local diante de seis sistemas distintos para falta localizada no meio da linha.

maiores amplitudes são os referentes ao modelo de Bergeron idealmente transposto, J. Marti idealmente transposto e J. Marti transposto, enquanto que na segunda frente, as três maiores amplitudes passam a ser dos sinais: Bergeron idealmente transposto, Bergeron Transposto e Bergeron não transposto. Os valores de amplitude e tempo para as duas frentes de ondas são verificados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4.** Amplitude e tempo de cada sinal.

Local	Tipo de Modelagem	Tempo (ms)	Amplitude (A)
1	J. Marti Transposto	34,2700	267,1066
1	J. Marti Não Transposto	34,2700	253,7526
1	J. Marti Idealmente Transposto	34,2770	271,7760
1	Bergeron Transposto	34,2740	263,4802
1	Bergeron Idealmente Transposto	34,2830	272,9893
1	Bergeron Não Transposto	34,2830	261,0118
2	J. Marti Transposto	34,3360	-134,1511
2	J. Marti Não Transposto	34,3340	-126,5568
2	J. Marti Idealmente Transposto	34,3440	-139,7541
2	Bergeron Transposto	34,3410	-146,3607
2	Bergeron Idealmente Transposto	34,3500	-154,0733
2	Bergeron Não Transposto	34,3490	-142,7692

O conhecimento de todos esses pontos analisados é importante, pois possuem impacto direto sobre a precisão da localização da falta e na atuação dos sistemas de proteção, visto que a localização de faltas via OV's está diretamente relacionada aos instantes de chegada das ondas

---

no terminal, assim como os algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo que se baseiam na análise de OV's dependem desse instante, bem como das amplitudes dessas ondas para tomar uma decisão de atuação.

# CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS

Neste trabalho, apresentaram-se a análise de performance, a validação computacional e a implementação do filtro DS seguida de análise diante de sistemas modelados com diferentes técnicas utilizadas para simular transitórios em linhas de transmissão em sistemas elétricos.

Inicialmente, foi realizado no Capítulo 2 um estudo teórico sobre os conceitos fundamentais para a compreensão do filtro e sua importância. De tal maneira, definições sobre as faltas em LTs e a necessidade de uma boa precisão em sua localização, a teoria sobre ondas viajantes e transitórios e a diferença entre a utilização de modelos a parâmetros concentrados e distribuídos foram introduzidos. Ademais, apresentaram-se as diferenças entre os métodos de Bergeron e J. Marti utilizados para modelar linhas de transmissão e simular transitórios no *software* ATP.

Em seguida, nos Capítulos 3 e 4, foi explicado o filtro DS presente no relé SEL-T400L e quais ajustes típicos este dispositivo utiliza, detalhando como são encontrados os valores para alguns parâmetros e quais seriam variados na implementação computacional para verificar o impacto que cada configuração possui sobre a saída do filtro bem como na identificação de OV's considerando a resposta tanto no domínio do tempo quanto da frequência. Além disso, os sistemas utilizados na validação do modelo de filtro para a simulação dos transitórios de faltas na LT foi explicitado. As diferentes LTs utilizadas para a aplicação do modelo computacional e análise de diferentes modelagens de linha sobre a resposta do filtro, também foram demonstradas.

No decorrer do Capítulo 5, o filtro foi modelado computacionalmente com variações no tamanho da janela, na frequência de amostragem e na quantidade de pontos analisados, bem como estudos a respeito das respostas no tempo e na frequência foram realizados. Neste contexto, com a validação e o melhor entendimento sobre o desempenho esperado para o filtro, o estudo de seu comportamento diante seis diferentes situações de LTs, modeladas usando modelos de Bergeron e J. Marti, foi realizado.

As simulações com variados valores de  $T_{DS}$  mostraram a importância da utilização de pe-

quenos valores de coeficientes para a janela do filtro, uma vez que coeficientes elevados podem impossibilitar a detecção de todas as frentes de ondas, principalmente de OV's subsequentes a primeira incidente, quando observadas as respostas no domínio do tempo.

Ainda no estudo relativo ao  $T_{DS}$ , contudo visando o entendimento da resposta em frequência para cada configuração do filtro, evidenciou-se a relação direta de atenuação da amplitude do sinal em altas frequências com o aumento da duração da janela de dados. Sendo que para uma boa visualização das ondas de saída e boa detecção de OV's é necessário que o sinal tenha ganho suficientemente alto. Diferentemente, quanto ao ganho na frequência fundamental, espera-se que o ganho do filtro seja reduzido de tal forma a atenuá-la expressivamente. Como quão maior  $T_{DS}$ , menor a atenuação na frequência fundamental, é recomendado o uso de valores pequenos para a janela de coeficientes do filtro. Mediante ao exposto, o uso do valor de  $T_{DS} = 21 \mu s$  pelo fabricante do relé está em conformidade com a necessidade de sinais de saída precisos e limpos que contenham a maior quantidade de informações corretas a respeito da falta que gerou tal transitório.

A precisão da saída do filtro está relacionada com a quantidade de pontos analisados, quanto mais pontos são utilizados, mais preciso. Com  $F_s = 10$  MHz, a análise no domínio do tempo mostra as ondas triangulares com formato melhor definido do que para  $F_s = 1$  MHz. Já na avaliação na frequência, o mesmo comportamento de atenuação do sinal com o aumento da frequência é observado. Portanto, as vantagens do uso de  $F_s = 10$  MHz estão na capacidade de processar fenômenos transitórios de frequências mais elevadas e na maior atenuação imposta ao sinal na frequência fundamental, diminuindo a parcela passante da componente fundamental do sistema.

A validação do filtro implementado é necessária para confirmar a acurácia das conclusões realizadas sobre os ajustes do filtro. Por meio da comparação entre os resultados obtidos para as mesmas situações do filtro modelado no presente trabalho e no filtro real presente no relé SEL-T400L foi possível confirmar a confiabilidade do modelo implementado.

Considerando as diferentes técnicas de modelagens e tipos de LTs, conclui-se que os diferentes métodos influenciam a geração de transitórios e, por conseguinte, a resposta do filtro. Os sinais resultantes das LTs modeladas segundo J. Marti se propagam com maior velocidade do que as modeladas segundo Bergeron, porém apresentam uma maior atenuação e dispersão

durante sua propagação. Nas análises, observa-se, também, que as ondas resultantes das linhas idealmente transpostas e transpostas não são tão similares quanto esperado, uma vez que para algumas situações elas se aproximam mais da linha não transposta, o que pode ser explicado pelo fato das transposições da linha transposta e da idealmente serem feitas de forma diferente, a linha idealmente transposta muda a posição das fases em trechos extremamente pequenos, o que não é viável na prática (FLORES, 2006).

Sem dúvida, todos os estudos realizados no decorrer do trabalho interferem na localização de faltas e conseqüentemente na atuação de sistemas de proteção, podendo melhorar ou piorar a atuação de algoritmos para identificar a posição do distúrbio. Além de influenciar nas outras aplicabilidades do filtro. Visto que a localização de faltas via OV's está diretamente relacionada aos instantes de chegada das ondas no terminal, assim como os algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo que se baseiam na análise de OV's dependem desse instante, bem como, das amplitudes dessas ondas para tomar uma decisão de atuação. Tendo em vista a continuação e aprimoramento dos estudos feitos neste trabalho algumas pesquisas e atividades futuras são propostas:

- Avaliar o desempenho do filtro DS e de algoritmos de localização de faltas perante outros métodos de modelagem de LTs;
- Aplicar algoritmos de localização de falta nas saídas do filtro com  $F_s = 10$  MHz e  $F'_s = 1$  MHz;
- Estudo do filtro DS junto com filtro passa alta;
- Avaliar o comportamento do filtro para outros tipos de falta;
- Analisar as vantagens do uso do filtro DS perante outros métodos já existentes;
- Avaliar o desempenho do filtro em ambientes ruidosos;
- Avaliar o desempenho do filtro e de algoritmos de localização de falta para outras posições de faltas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa Nº 729 de 28 de julho de 2016*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/atren2016729.pdf>>. Citado na página 2.
- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado na página 5.
- CABELLERO, P. T. Mestrado em Engenharia Elétrica, *Representação de Linhas de Transmissão por Meio de Modelo de Bergeron: Inclusão do Efeito da Frequência nos Parâmetros Longitudinais*. Ilha Solteira, São Paulo, Brasil: [s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 13.
- COMITÊ LATINO AMERICANO DE USUÁRIOS DO EMTP/ATP. *Curso Básico sobre a Utilização do ATP*. [S.l.], 1994. Citado na página 21.
- COSTA, F. B. Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 6, p. 2674–2687, dez 2014. Citado na página 3.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solutions of electromagnetic transients in single and multiphase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 388–399, abr. 1969. Citado na página 12.
- FAYBISOVICH, V.; FEIGINOV, M.; KHOROSHEV, M. I. Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, p. 1–0, 2010. Citado na página 5.
- FLORES, A. V. E. Mestrado em Engenharia Elétrica, *Análise da Correta Modelagem da Transposição em Linhas de Transmissão no Domínio da Frequência*. Campinas, São Paulo, Brasil: [s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 23 and 45.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*, 5. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 6.
- GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. [S.l.]: Wiley (2. ed. [S.1]), 1991. Citado na página 5.
- GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; ETERNOD, J. L. *Directional Elements - How Fast Can They Be?* [S.l.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas iii and 18.
- LOPES, D. F. F. V.; JR.; NEVES, W. L. A. *A Traveling-Wave Detection Method Based on Parks Transformation for Fault Locators*. [S.l.], 2013. Citado na página 3.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados N/ ao Sincronizados de Dois Terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.

- LOPES, F. V.; LEITE, E.; RIBEIRO, J. P.; LOPES, L.; PIARDI, A.; OTTO, R.; NEVES, W. *Using the Differentiator-Smoother Filter to Analyze Traveling Waves on Transmission Lines: Fundamentals, Settings and Implementation*. [S.l.], 2019. Citado 8 vezes nas páginas iii, 3, 5, 15, 16, 17, 18, and 31.
- LOPES, F. V.; NEVES, W.; LEITE, E.; RIBEIRO, J. P. *Aplicação do Filtro Differentiator-Smoother Durante a Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão*. [S.l.], 2018. Citado na página 31.
- MARTI, J. R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 1, p. 147–157, jan 1982. Citado na página 13.
- MARTI, L. Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 3, n. 3, p. 1099–1988, abr. 1988. Citado na página 12.
- METELLO, E. Mestrado em Engenharia Elétrica, *Transformada Wavelet Aplicada Localização de Falhas por Ondas Viajantes*. Brasília, Distrito Federal, Brasil: [s.n.], 2012. Citado na página 2.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede-Submódulo 2.6 Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Citado na página 2.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *PAR 2017-2019 - Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SI*. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/expansao>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 2.
- PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. *Guia de Referência para a Segurança das Infraestruturas Críticas da Informação*. Brasília, 2010. Disponível em: <[http://dsic.planalto.gov.br/legislacao/2\\\_Guia\\\_SICI.pdf](http://dsic.planalto.gov.br/legislacao/2\_Guia\_SICI.pdf)>. Citado na página 1.
- RANGEL, e. K. H. K. e. M. P. B. R. K. *Sistema de Inspeção de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Veículos Aéreos não-Tripulados*. S. J. Campos, SP, 2009. Citado na página 1.
- RIBEIRO, E. P. A.; LOPES, F. V.; HONORATO, T. R. *Modelagem do Filtro Differentiator-Smoother: Validação via Análise de Transitórios e Resposta em Frequência de Dispositivos Microprocessados Reais*. [S.l.], 2019. Citado 8 vezes nas páginas iii, v, 15, 21, 22, 23, 25, and 26.
- RIBEIRO, E. P. A.; LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P.; LEITE, E. *ATP/MODELS Differentiator-Smoother Filter Model Validated Using Actual Time-Domain Relay*. [S.l.], 2018. Citado na página 10.
- RIBEIRO, J. ao P. G. *Estudo e Implementação de Funções de Proteção no Domínio do Tempo Disponíveis no Relé SEL-T400L*. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, mai. 2017. Citado 4 vezes nas páginas 2, 7, 10, and 14.

- SAHA, J. I. e. E. R. M. M. *Fault Location on Power Networks*. [S.l.]: Springer, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.
- SANTOSO, S.; POWERS, E.; GRADY, W.; HOFMANN, P. Power quality assessment via wavelet transform analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 924–930, abr 1996. Citado na página 31.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMAN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B. *Locating Faults by the Traveling Waves They Launch*. [S.l.], 2014. Citado 6 vezes nas páginas iii, 3, 7, 8, 11, and 14.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. *Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults*. [S.l.], 2015. Citado na página 3.
- SEL. *Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder*. [S.l.], 2017. Citado na página 29.
- SLUIS, L. van der. *Transients in Power Systems*. [S.l.]: Wiley, 2001. Citado na página 7.
- TLEIS, N. D. *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. [S.l.]: Elsevier, 2008. Citado na página 2.
- ZANETTA, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Edusp, 2003. Citado na página 5.
- ZIMATH, S. L.; RAMOS, M. A.; FILHO, J. E. S. Comparison of impedance and travelling wave fault location using real faults. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, p. 1–5, abr 2010. Citado na página 3.