UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Caracterização de Cabos de Baixa Tensão: Análise Comparativa entre Métodos de Admitância e Transmitância considerando Limitações de Medição

Daniel da Silva Sarmento

João Pessoa, Brasil
8 de Junho de 2026

Daniel da Silva Sarmento

CARACTERIZAÇÃO DE CABOS DE BAIXA TENSÃO: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE ADMITÂNCIA E TRANSMITÂNCIA CONSIDERANDO LIMITAÇÕES DE MEDIÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Fabrício Braga Soares de Carvalho
Coorientador: Jose Mauricio Ramos de Souza Neto

João Pessoa, Brasil

8 de Junho de 2026

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S246c Sarmento, Daniel da Silva.
Caracterização de cabos de baixa tensão : análise comparativa entre métodos de admitância e transmitância considerando limitações de medição / Daniel da Silva Sarmento. - João Pessoa, 2026.
73 f.

Orientação: Fabrício Braga Soares de Carvalho.
Coorientação: Jose Mauricio Ramos de Souza Neto.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Modelagem de cabos. 2. Redes de baixa tensão. 3. Estimação de parâmetros. 4. Transitórios eletromagnéticos. 5. Cabos de baixa tensão. 6. Cabos elétricos. 7. Caracterização elétrica. 8. Efeitos eletromagnéticos. 9. Matriz de admitância. 10. Matriz de transmitância. I. Carvalho, Fabrício Braga Soares de. II. Souza Neto, Jose Mauricio Ramos de. III. Título.

Elaborado por JONISMAR KENDYS DA SILVA LEAO - CRB-4/2332

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB

CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

CARACTERIZAÇÃO DE CABOS DE BAIXA TENSÃO: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE ADMITÂNCIA E TRANSMITÂNCIA CONSIDERANDO LIMITAÇÕES DE MEDIÇÃO

Elaborada por

DANIEL DA SILVA SARMENTO

como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br FABRICIO BRAGA SOARES DE CARVALHO
Data: 09/06/2026 08:05:21-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

PROF. DR. FABRÍCIO BRAGA SOARES DE CARVALHO
Presidente – UFPB

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE MAURICIO RAMOS DE SOUZA NETO
Data: 10/06/2026 14:07:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

PROF. DR. JOSÉ MAURÍCIO RAMOS DE SOUZA NETO
Coorientador – UFPB

Documento assinado digitalmente
gov.br FELIPE VIGOLVINO LOPES
Data: 11/06/2026 10:22:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

PROF. DR. FELIPE VIGOLVINO LOPES
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente
gov.br KLEBER MELO E SILVA
Data: 10/06/2026 12:55:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

PROF. DR. KLEBER MELO E SILVA
Examinador Externo – UNB

João Pessoa/PB, 08 de Junho de 2026

A Dona Maria e Seu Francisco (em memória),
Que tornaram meus estudos possíveis mesmo diante de tantos sacrifícios,
E mantiveram a fé em mim, até quando eu perdi a minha.
A vocês dedico todo o meu amor e a minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por ter me dado uma Mãe e um Pai que me amam incondicionalmente e que desde pequeno sabiam do valor da educação. Mesmo diante de tantas dificuldades, tornaram possível toda a minha trajetória e abraçaram meu sonho de estudar. Não há palavras que expressem a minha gratidão por ter tido vocês em minha vida e por todos os esforços e sacrifícios que vocês fizeram para eu estar onde estou hoje. Amo vocês até meu último dia.

Perder meu pai foi a coisa mais difícil da minha vida, mas tive a benção de conhecer pessoas que me estenderam a mão, me orientaram, corrigiram, me deram suporte e me aconselharam nos caminhos da vida para chegar até aqui. Fizeram desse mestrado realmente uma virada de chave positiva na minha vida. Minha profunda gratidão a meus orientadores, Fabrício e José Maurício e também a Sidnéia e Felipe, os quais tive o privilégio conhecer, mas também tenho o privilégio de chama-los de amigos. Jamais esquecerei todo o apoio que vocês me deram no momento que eu mais precisei. Contem comigo sempre.

Agradeço também a Fapesq-PB pela bolsa de mestrado no auxílio a pesquisa.

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho uma análise comparativa entre os métodos da matriz de Admitância e da matriz de Transmitância, baseada na formação da matriz ABCD conforme a teoria dos quadripolos, para a estimação de parâmetros elétricos distribuídos (resistência (R), indutância (L) e capacitância (C), além de analisar de forma complementar a condutância (G)) em cabos de baixa tensão de comprimento reduzido. A metodologia fundamenta-se em uma abordagem de modelagem na qual os parâmetros são extraídos exclusivamente a partir de medições nos terminais dos condutores. A validação foi conduzida inicialmente via simulações em massa no software *Alternative Transients Program* (ATP)/ATPDraw, abrangendo 5.376 cenários de teste. Os resultados demonstraram que o método da Transmitância possui maior robustez numérica em condições de elevado ruído (SNR de 10 dB) frente ao método da Admitância. Na etapa experimental, a metodologia foi aplicada a um cabo real de 6 mm^2 e 10 m de comprimento, cujos parâmetros estimados foram aplicados e comparados através de simulação por meio de um ensaio de degrau independente. O modelo computacional resultante reproduziu de forma característica o comportamento real em laboratório com um erro relativo de 4,38%. Os algoritmos foram consolidados em uma ferramenta computacional, provendo uma solução funcional para a obtenção de modelos de maior fidelidade de medições reais voltados ao estudo dos efeitos eletromagnéticos e diagnóstico de perdas não-técnicas.

Palavras-chave: Modelagem de Cabos, Redes de Baixa Tensão, Matriz de Admitância e Transmitância, Estimação de Parâmetros, Transitórios Eletromagnéticos.

ABSTRACT

This work presents a comparative analysis between the Admittance and Transmittance matrix methods, based on the formation of the ABCD matrix according to two-port network theory, for the estimation of distributed electrical parameters (resistance (R), inductance (L), and capacitance (C), in addition to a complementary analysis of conductance (G)) in short-length low-voltage cables. The methodology is based on a modeling approach in which the parameters are extracted exclusively from measurements taken at the conductor terminals. Validation was initially conducted via mass simulations using the Alternative Transients Program (ATP)/ATPDraw software, encompassing 5,376 test scenarios. The results demonstrated that the Transmittance method exhibits greater numerical robustness under high-noise conditions (10 dB SNR) compared to the Admittance method. In the experimental stage, the methodology was applied to a real 6 mm^2 and 10-meter-long cable, whose estimated parameters were applied and compared via simulation using an independent step response test. The resulting computational model characteristically reproduced the real behavior observed in the laboratory with a relative error of 4.38%. The algorithms were consolidated into a computational tool, providing a functional solution to obtain higher-fidelity models from real measurements, aimed at the study of electromagnetic effects and the diagnosis of non-technical losses.

Keywords: Cable Modeling, Low-Voltage Networks, Admittance and Transmittance Matrix, Parameter Estimation, Electromagnetic Transients.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução das perdas totais nas concessionárias de distribuição de energia elétrica, técnicas e não técnicas, sobre a energia injetada no período de 2008 a 2024. 19
Figura 2 – Modelo de parâmetros distribuídos para linhas longas, adaptado de [1]. 26
Figura 3 – Modelo matemático de impedância série para linhas médias. 26
Figura 4 – Modelo matemático de impedância série para linhas curtas. 27
Figura 5 – Trafo de distribuição e as linhas das redes de média e baixa tensão. . . 29
Figura 6 – Ramais de entradas monofásicos. 30
Figura 7 – Diagrama de medição e da obtenção do modelo de matriz de admitância. 34
Figura 8 – Evolução do erro relativo na estimação de parâmetros entre diferentes métodos. 38
Figura 9 – Diagrama geral da abordagem computacional proposta. 40
Figura 10 – Circuito aberto com a fonte do lado esquerdo. 43
Figura 11 – Circuito aberto com a fonte do lado direito. 43
Figura 12 – Circuito para avaliação do curtocircuito com impedância de 1mΩ ligada ao terra. 44
Figura 13 – Ilustração de como o algoritmo interage os valores de R,L e C gerados. 44
Figura 14 – Configurações de grandezas para simulação em série. 45
Figura 15 – Sinais de tensão com os níveis de ruídos: sem e com 40, 30 e 10 dB. . . 49
Figura 16 – Detalhamento da evolução do erro na Resistência em função do ruído. . 53
Figura 17 – Detalhamento da evolução do erro na indutância em função do ruído. . 54
Figura 18 – Detalhamento da evolução do erro na capacitância em função do ruído. 55
Figura 19 – Detalhamento do cálculo da condutância nos diferentes níveis de ruído. 56
Figura 20 – Panorama global de desempenho e robustez entre os métodos avaliados. 56
Figura 21 – Configuração da bancada de instrumentação para a Medição 1 (M1). . 57
Figura 22 – Configuração da bancada de instrumentação para a Medição 2 (M2). . 57
Figura 23 – Configuração de medição para ensaio de degrau. 58
Figura 24 – Modelo de cabo para estudos transitórios de baixa tensão. 59
Figura 25 – Parâmetros estimados do cabo real inseridos no modelo de simulação distribuído. 59
Figura 26 – Parâmetros estimados do cabo real inseridos no modelo de simulação em topologia π. 59
Figura 27 – Comparativo de curvas aumentando o número de seções de cabos em modelo π. 60
Figura 28 – Comparativo de curvas aumentando o número de seções de cabos em modelo distribuído. 60
Figura 29 – Modelo de cabo de baixa tensão para estudos transitórios de [2]. 61

Figura 30 – Comparativo da curva real e da curva simulada obtida no ensaio de degrau. 61
Figura 31 – Progressão de erro da curva real e simulada. 62
Figura 32 – Interface principal da ferramenta com configuração dos parâmetros físicos e seleção dos cenários de ruído. 63
Figura 33 – Painel de monitoramento durante a execução do processamento em massa das simulações. 64
Figura 34 – Aba de resultados com tabela comparativa de desempenho entre os métodos avaliados. 64
Figura 35 – Aba de dados gráficos de desempenho entre os métodos avaliados. . . . 64
Figura 36 – Aba de dados de laboratório com carregamento dos arquivos M1 e M2 e mapeamento das variáveis de entrada para estimação experimental. . 65
Figura 37 – Resultado da estimação de parâmetros distribuídos a partir das medições experimentais de bancada exibido na interface da ferramenta. 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Configuração da Geração Pseudo-Aleatória 45
Tabela 2 – Parâmetros calculados a partir das medições de bancada para o cabo de 6mm². 58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWGN	*Additive White Gaussian Noise* (Ruído Branco Gaussiano Aditivo)
BT	Baixa Tensão
EMT	*Electromagnetic Transients* (Transitórios Eletromagnéticos)
ATP	*Alternative Transients Program*
ATPDraw	Interface gráfica do ATP
R	Resistência
L	Indutância
C	Capacitância
G	Condutância
TDR	*Time-Domain Reflectometry* (Reflectômetro no Domínio do Tempo)
GIS	*Geographic Information System* (Sistema de Informação Geográfica)
Y	Matriz de Admitância (*Ybus*)
T	Matriz de Transmitância ($ABCD$)
ABCD	Parâmetros de Transmissão em Quadripolos
DFFT	*Discrete Fast Fourier Transform* (Transformada Discreta de Fourier)
DFT	*Discrete Fourier Transform* (Transformada Discreta de Fourier)
FFT	*Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier)
Vp	Velocidade de Propagação da Onda
Zc	Impedância Característica
γ	Constante de Propagação
TC	Transformador de Corrente
Vpp	Volts pico a pico
ω	Frequência angular do sinal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 OBJETIVOS 15
1.1.1 Objetivos Específicos 16

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17
2.1 POR QUE MODELAR CABOS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA? 17
2.2 PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 17
2.3 MÉTODOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PERDAS NÃO TÉCNICAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO 19
2.3.1 Métodos Convencionais e Baseados em Estimação de Estado . 20
2.3.2 Métodos Baseados em Infraestrutura de Medição Inteligente e Inteligência Artificial 20
2.3.3 Técnicas de Reflectometria para Diagnóstico de Cabos 21
2.3.4 Importância da Estimação de Parâmetros Distribuídos em outras Aplicações da Engenharia Elétrica 23
2.4 DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO 24
2.4.1 Linhas Longas 25
2.4.1.1 Parâmetros Distribuídos 25
2.4.2 Linhas Médias 26
2.4.2.1 Modelagem Matemática e Contexto Físico: 26
2.4.3 Linhas Curtas 27
2.4.3.1 Modelagem Matemática e Contexto Físico: 27
2.5 DESAFIOS DO USO DOS MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM CENÁRIOS DE BAIXA TENSÃO 28
2.5.1 O Ramal de Serviço Individual 29
2.5.2 Implicações Metrológicas e de Modelagem em Cabos de Curta Extensão 30
2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO 31
2.6.1 O Programa ATPDraw como Ambiente de Simulação 32

3 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO 33
3.1 ESTIMAÇÃO DE FASORES SINCRONIZADOS 33
3.2 MODELAGEM CAIXA-PRETA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA . . 33
3.2.1 Método da Matriz de Admitância Nodal 34
3.2.1.1 Extração de Parâmetros via Admitância 35

3.2.1.2 Limitações em Cabos Curtos . . . 36
3.2.2 Método da Matriz de Transmitância (ABCD) . . . 36
3.2.2.1 Aplicação da matriz de Transmitância Passo a Passo . . . 37
3.2.2.2 Maior Estabilidade em Cabos Curtos . . . 37
3.2.3 Análise Comparativa de Estabilidade Numérica e Propagação de Erros . . . 39

4 PROCESSAMENTO PARA ESTIMAÇÃO DE GRANDEZAS 40
4.0.1 Cenários de Simulação para Calibração do Algoritmo . . . 42
4.0.2 Transformação para o Domínio da Frequência: A Transformada Numérica de Laplace . . . 45
4.0.3 Estruturação via Matriz de Admitância Nodal . . . 46
4.0.4 Estruturação via Matriz de Transmitância . . . 47
4.1 ADAPTAÇÕES PARA CENÁRIOS MONOFÁSICOS E DIVERGÊNCIAS DA LITERATURA . . . 47
4.1.1 Redução de Dimensionalidade e Perda de Informação de Acoplamento . . . 48
4.2 AVALIAÇÃO DE ERROS E MODELAGEM DE RUÍDO GAUSSIANO 48
4.2.1 Modelo Estatístico do Ruído . . . 48
4.2.2 Níveis de Ruído . . . 49
4.2.3 Estratégia de Convergência (Janelamento Adaptativo) . . . 50
4.3 ESTABILIZAÇÃO DO FASOR E SELEÇÃO DO PONTO DE CÁLCULO 50
4.3.1 Princípio do Janelamento Adaptativo . . . 50
4.3.1.1 Seleção do Fasor Final . . . 51

5 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM SIMULAÇÃO 53
5.1 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA . . . 53
5.2 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA INDUTÂNCIA . . . 54
5.3 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA CAPACITÂNCIA . . . 54
5.4 ANÁLISE DA CONDUTÂNCIA . . . 55
5.5 ANÁLISE DO DESEMPENHO GERAL DA ESTIMAÇÃO . . . 56
5.6 TESTE COM MEDIÇÕES REAIS . . . 57
5.7 COMPARATIVO DO MODELO COMPUTACIONAL . . . 58
5.8 FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA . . . 62

6 CONCLUSÕES . . . 67
6.1 TRABALHOS FUTUROS . . . 68
6.2 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS REALIZADAS DURANTE O MESTRADO . . . 69

REFERÊNCIAS 70

1 INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica em baixa tensão (BT) vêm passando por um processo de crescente complexidade operacional, impulsionado pela inserção de novas tecnologias, pela variabilidade das cargas e pela necessidade de maior observabilidade dos sistemas. Nesse contexto, a modelagem elétrica dos elementos da rede assume papel central para previsibilidade e estudos de rede. Os cabos, especificamente, constituem a infraestrutura física predominante desses sistemas, o que torna sua representação cada vez mais importante à medida que técnicas e equipamentos antes utilizados somente em linhas de transmissão começam a chegar na distribuição. Essa representação é condição necessária para aplicações de crescente relevância nesse ramo, como estudos detalhados de harmônicos gerados pelo chaveamento de inversores fotovoltaicos, a localização de faltas em redes de distribuição secundária e a detecção de perdas não-técnicas utilizando métodos baseados em reflectometria.

As técnicas mais avançadas para identificar furtos de energia na distribuição utilizam em sua maioria técnicas de reflectometria, pois permitem fazer uma análise de integridade do cabo mesmo sem a presença de carga. Essas técnicas são mais assertivas quando se há uma estimativa mais precisa dos parametros dos cabos em análise, que são baseados nos parâmetros primários por unidade de comprimento, resistência (R), indutância (L), capacitância (C) e condutância (G). Com uma boa estimativa desses parâmetros, é possível descrever com mais precisão as grandezas secundárias agregadas, como a impedância característica e a constante de propagação, sendo fundamentais para a análise tanto em regime permanente quanto em transitórios eletromagnéticos de alta frequência.

Os parâmetros distribuídos são normalmente obtidos por meio de processos de estimação a partir de medições elétricas de tensão e corrente em diferentes condições operacionais. Podem ser obtidos também por estimativas matemáticas considerando dados do fabricante do condutor e dos demais elementos. Essa etapa de caracterização é crítica, pois ela irá gerar os valores que serão adotados no modelo, que em linhas de transmissão são usados para validar em ambiente de simulação várias condições de operação da linha.

No segmento de baixa tensão, entretanto, essa estimação apresenta desafios específicos que a distinguem fundamentalmente dos problemas análogos em linhas de transmissão de alta tensão: os ramais de serviço residenciais possuem comprimentos da ordem de poucos metros. Isso pode resultar em quedas de tensão ao longo do condutor muitas vezes comparáveis à incerteza dos instrumentos de medição disponíveis, o que requer equipamentos de alta precisão e impõem nas medições variáveis complexas. Uma vez que as grandezas envolvidas na caracterização de cabos da ordem de metros passam a ser pequenas, os próprios instrumentos de medição passam a interferir diretamente nas

grandezas elétricas.

Como um caminho alternativo a esse problema, propõe-se neste trabalho uma abordagem de caracterização em alta frequência, utilizando um sinal senoidal de 60 kHz injetado em um segmento de cabo de cobre, com secção transversal de 6 mm² e isolamento de PVC, com 10 m de comprimento. Um seguimento em paralelo deste mesmo cabo é tomado como referência ao terra, simulando uma configuração monofásica de um ramal de serviço de distribuição, elevando a magnitude das grandezas mensuráveis a níveis compatíveis com a resolução dos instrumentos utilizados. Os fasores de tensão e corrente nos dois terminais do cabo são extraídos por um algoritmo de janelamento baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT) com janela de Hanning, que monitora iterativamente a convergência do fasor calculado e seleciona automaticamente o ponto de regime permanente, tornando o processo menos suscetível à presença de ruído. Esses fasores são então submetidos a duas formulações matriciais de cálculo para a estimação dos parâmetros distribuídos: o método da Matriz de Admitância Nodal e o método da Matriz de Transmitância, que consiste na caracterização do cabo de forma muito mais direta: como um quadripolo (sistema de duas portas ou "caixa-preta"com uma entrada e uma saída). A comparação sistemática entre os dois métodos, sob diferentes níveis de degradação do sinal, é utilizada para garantir em ambiente controlado a precisão da estimação dos parâmetros distribuídos.

A validação da metodologia é estruturada em duas etapas complementares. Na primeira, um ambiente de simulação controlado é construído no ATP/ATPDraw com 1344 combinações pseudo-aleatórias de R, L e C, cada uma submetida a quatro perfis de ruído (sem ruído, SNR de 40 dB, 30 dB e 10 dB), totalizando 5376 cenários de teste. Essa base de dados sintética permite quantificar a acurácia e a robustez de cada formulação matricial com referência de comparação exata, uma vez que os parâmetros inseridos na simulação são conhecidos com precisão e não há influência de instrumentos de medição. Na segunda etapa, a metodologia é aplicada a medições experimentais obtidas em laboratório sobre um cabo real de 6 mm², e os parâmetros estimados são inseridos em um modelo de simulação cujo resultado é confrontado com um ensaio de degrau independente, validando a cadeia completa desde a estimação até a melhor reprodução do comportamento do condutor.

Adicionalmente, os algoritmos desenvolvidos foram consolidados em uma ferramenta computacional com interface gráfica. A ferramenta permite a aplicação direta dos métodos de Admitância e Transmitância para caracterização de cabos a novos conjuntos de dados de simulação ou a medições experimentais de campo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e analisar uma metodologia para estimação de parâmetros distribuídos em cabos de baixa tensão de curta extensão. A metodologia empregada para as estimativas é baseada em formulações matriciais aplicadas

a medições fasoriais, com foco na obtenção de modelos de simulação representativos para estudos elétricos em redes de distribuição secundárias. Dessa forma, espera-se analisar um caminho alternativo para contribuir com o desenvolvimento de técnicas de identificação de perdas não-técnicas que dependam da estimativa de parâmetros distribuídos.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são definidos:

- Desenvolver um modelo de simulação no ATP/ATPDraw que permita a geração de dados controlados para calibração e validação da metodologia proposta, com parametrização pseudo-aleatória de R, L e C em 1344 cenários distintos;
- Implementar e comparar dois algoritmos de estimação de parâmetros distribuídos baseados em formulações matriciais, o método da Matriz de Admitância Nodal e o método da Matriz de Transmitância (parâmetros ABCD), em configuração monofásica;
- Avaliar quantitativamente a precisão e a estabilidade numérica dos métodos de estimação por meio do erro médio percentual dos parâmetros R, L, C e G em função do nível de ruído(sem ruído, SNR de 40 dB, 30 dB e 10 dB), identificando as limitações físicas e numéricas de cada formulação;
- Aplicar a metodologia desenvolvida a medições obtidas em um cabo real de 6 mm² em bancada laboratorial e validar os parâmetros estimados por meio de comparação com a resposta transitória a um ensaio de degrau independente;
- Consolidar os algoritmos em uma ferramenta computacional com interface gráfica, capaz de processar tanto dados de simulação quanto medições experimentais, visando facilitar a reprodução e continuidade do trabalho;
- Explorar uma base metodológica e computacional para a futura expansão da abordagem para sistemas bifásicos e trifásicos, bem como para sua aplicação em técnicas de reflectometria voltadas à detecção de perdas não-técnicas em redes de distribuição de baixa tensão em equipamentos de inspeção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POR QUE MODELAR CABOS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA?

A operação eficiente das redes modernas de distribuição de energia elétrica exige cada vez mais uma compreensão profunda e precisa do comportamento físico de seus componentes. Dentre eles, os mais numerosos são os condutores. A caracterização precisa dos cabos de distribuição, foco central deste trabalho, atua como um caminho necessário para superar varias limitações operacionais das concessionárias de energia elétrica. A extração e modelagem exata das grandezas elétricas (R, L, C) viabilizam a aplicação de técnicas avançadas de monitoramento da rede.

A caracterização e otimização de modelos de cabos viabiliza o uso de técnicas avançadas de identificação de faltas utilizadas na transmissão que podem ajudar a mitigar um dos maiores e mais onerosos desafios estruturais enfrentados pelo setor de distribuição elétrica: a identificação, quantificação e mitigação das perdas não-técnicas de energia.

2.2 PERDAS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A distribuição de energia elétrica ao redor do mundo é marcada por um desafio estrutural que se manifesta tanto nos sistemas de países desenvolvidos quanto naqueles em desenvolvimento: a existência de perdas de energia ao longo das redes de transmissão e distribuição. Essas perdas são classificadas, de modo geral, em duas categorias fundamentais: as perdas técnicas (PT) e as perdas não técnicas (PNT). Embora distintas em sua natureza e origem, ambas impõem custos expressivos ao sistema elétrico e, consequentemente, aos consumidores finais.

As perdas técnicas são inerentes ao funcionamento de qualquer sistema de entrega de energia elétrica [3]. Elas resultam da dissipação de energia nas linhas de transmissão, transformadores, cabos condutores e demais elementos da rede, sendo governadas pelas leis físicas fundamentais da eletricidade, notadamente o efeito Joule e as perdas no núcleo de ferro dos equipamentos magnéticos [4]. Por serem fisicamente inevitáveis, as PT são reconhecidas pelas agências reguladoras e incorporadas às tarifas de energia dentro de limites considerados eficientes. Em contrapartida, as perdas não técnicas, também conhecidas como perdas comerciais, têm origem externa ao comportamento físico da rede, sendo predominantemente atribuídas a ações ilícitas ou falhas de gestão: furtos de energia por meio de ligações clandestinas, fraudes em medidores, adulterações no sistema de medição, erros de leitura e irregularidades no faturamento [5].

No plano mundial, as perdas totais de transmissão e distribuição representam um problema de considerável magnitude econômica e ambiental. As perdas mundiais de eletricidade durante a transmissão e distribuição se mantêm na faixa de 8 a 9% de toda a

energia produzida no mundo [6]. Esse patamar tem impacto expressivo quando considerado em escala absoluta: as perdas nas redes elétricas resultam em aproximadamente 1 bilhão de toneladas de emissões de dióxido de carbono por ano [7]. Do ponto de vista financeiro, estimativas globais indicam que as perdas não técnicas geram um prejuízo da ordem de US$ 101,2 bilhões por ano em todo o mundo [8, 9]

No contexto da América Latina, as perdas elétricas assumem proporções particularmente elevadas em função da complexidade socioeconômica das áreas de concessão, das extensas redes de distribuição e das limitações históricas de infraestrutura. Nessa conjuntura, o Brasil se destaca como um dos países com maiores índices de perdas na região. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão responsável pela regulação do setor elétrico no Brasil, acompanha sistematicamente os índices de perdas de todas as distribuidoras nacionais e publica relatórios anuais detalhados sobre essa temática. De acordo com o relatório mais recente, referente ao ano de 2024, as perdas não técnicas no setor de distribuição de energia elétrica no Brasil totalizaram R$ 10,3 bilhões em 2024 [10], representando um aumento em relação a 2023, quando as perdas somaram R$ 9,97 bilhões, evidenciando um desafio contínuo na gestão da rede elétrica nacional. Em comparação, o custo das perdas técnicas somou cerca de R$ 11,2 bilhões em 2024, enquanto as perdas técnicas na Rede Básica (transmissão) geraram um custo adicional de R$ 1,5 bilhão [10].

O mercado de baixa tensão faturado representou aproximadamente 41,4% da energia injetada no Brasil em 2024 no relatório [10]. Este é o segmento de toda a rede elétrica brasileira onde as perdas não técnicas se concentram de forma mais expressiva, conforme mencionado no mesmo relatório. Isso ocorre pois nessa parcela do sistema elétrico, a fiscalização é mais desafiadora e o impacto social, mais sensível.

O gráfico de evolução histórica das PNT, que pode ser visto na Figura 1, trata sobre a energia injetada entre 2008 e 2024. É possível observar na Figura que os valores variaram entre 6,2% e 7,5% nos últimos 16 anos, com pico em 2020. Este ano foi o período em que a pandemia de COVID-19 e o *lockdown* geraram um aumento da vulnerabilidade social e consequentemente maior dificuldade para as concessionárias combaterem tais perdas. Esse dado ressalta que o problema das PNT está vinculada a fatores socioeconômicos e à capacidade operacional das distribuidoras, englobando profundamente aspectos sociais, jurídicos e regulatórios.

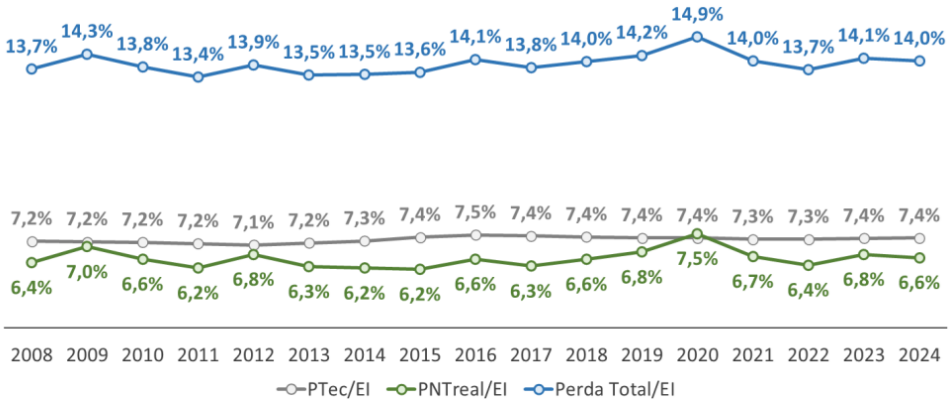


Figura 1 – Evolução das perdas totais nas concessionárias de distribuição de energia elétrica, técnicas e não técnicas, sobre a energia injetada no período de 2008 a 2024.
Fonte: ANEEL, 2025 [10].

A concentração das perdas não técnicas no Brasil é geograficamente desigual. As 10 distribuidoras com maiores montantes de perdas em 2024 respondem por 74,0% das perdas não técnicas do país, sendo que Light (RJ) e Amazonas Energia (AM), as duas primeiras colocadas no ranking, respondem por 34,1% do total [10]. Esse fenômeno de concentração evidencia que os maiores mercados, com redes de distribuição mais densas e extensas, são proporcionalmente mais vulneráveis às irregularidades, em particular nas redes de baixa tensão, onde a capilaridade da distribuição é densa e o monitoramento, mais difícil. Diante desse cenário, a ANEEL adota uma abordagem regulatória baseada em incentivos econômicos. Embora a agência não aplique penalidades diretas às distribuidoras que não atingem metas de redução de perdas, ela limita o repasse desses valores às tarifas cobradas dos consumidores, conhecida como política de incentivos, de modo que as concessionárias que não controlam adequadamente as perdas precisam arcar parcialmente com os prejuízos.

Além da dimensão regulatória e financeira, a problemática das perdas não técnicas possui implicações diretas sobre a modelagem e o planejamento das redes de distribuição de baixa tensão.

2.3 MÉTODOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PERDAS NÃO TÉCNICAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A identificação das perdas não técnicas (PNT) em sistemas de distribuição de energia elétrica constitui um campo de pesquisa ativo e multidisciplinar e cada vez mais latente, diante da gravidade do problema, no qual diferentes abordagens metodológicas têm sido propostas e investigadas ao longo das últimas décadas. De modo geral, essas metodologias podem ser classificadas em três grandes categorias [11]:

- Métodos convencionais baseados em inspeção e análise de consumo;

- Métodos baseados em infraestrutura de medição avançada com algoritmos de aprendizado de máquina e técnicas de inteligência artificial;
- Métodos baseados em diagnóstico físico dos cabos por meio de técnicas de reflectometria.

Cada uma dessas categorias apresenta características distintas quanto à precisão, custo de implantação, escalabilidade e aplicabilidade em diferentes níveis de tensão da rede elétrica.

2.3.1 Métodos Convencionais e Baseados em Estimação de Estado

Os métodos convencionais para identificação de PNT são, historicamente, os mais difundidos no setor elétrico e consistem, fundamentalmente, na comparação entre a energia consumida em um determinado trecho da rede e a energia efetivamente medida e faturada aos consumidores individualmente. Quando essa diferença supera os limites técnicos esperados para aquele segmento da rede, investiga-se a presença de irregularidades [12]. Essa abordagem operacionalmente simples apresenta limitações significativas: ela permite identificar a existência de PNT em determinada área, mas não localiza com precisão o ponto de ocorrência da irregularidade. Esse é um aspecto obrigatório para autuar os fraudadores perante a lei, exigindo inspeções de campo em áreas extensas, sem dar qualquer pista ou informação da fraude às equipes de inspeção, tomando um tempo considerável em cada análise.

Uma evolução dos métodos convencionais é a abordagem por estimação de estado, amplamente utilizada em sistemas de alta e média tensão. Nessa técnica, os parâmetros elétricos da rede, como impedâncias de linha e tensões nodais, são utilizados para estimar, de forma computacional, os fluxos de potência e os perfis de tensão esperados em cada ponto do sistema. Desvios estatisticamente significativos entre os valores estimados e os valores medidos são então utilizados como indicadores da presença de irregularidades [13]. Em [13] é demonstrado que o método de estimação de estado aliado à análise de variância é capaz de identificar com precisão regiões com PNT em redes de distribuição com medidores inteligentes. Esta técnica, porém, ainda mantém o problema operacional de não dar um suporte direcionado às equipes de campo para detecção direta da fraude em regiões menores.

2.3.2 Métodos Baseados em Infraestrutura de Medição Inteligente e Inteligência Artificial

Entre os classificadores supervisionados mais empregados na literatura destacam-se as Máquinas de Vetores de Suporte (*Support Vector Machines*, SVM), as Redes Neurais Profundas (*Deep Neural Networks*, DNN), as Redes Neurais Convolucionais (*Convolutional*

Neural Networks, CNN) e os modelos de aprendizado por reforço com gradiente (*Gradient Boosted*). Em [14] é apresentada uma aplicação de SVM para detecção de PNT em redes de distribuição, reportando resultados promissores sobre conjuntos de dados reais de concessionárias da Malásia. Posteriormente, o mesmo grupo aprimorou o classificador incorporando sistemas de inferência fuzzy, elevando a robustez do método frente à incerteza inerente aos dados de consumo [15, 16].

Métodos não supervisionados, como detecção de anomalias e agrupamentos, têm sido adotados quando não se dispõe de dados rotulados a respeito de fraudes [17]. A ausência de amostras rotuladas constitui um obstáculo conhecido na aplicação de modelos supervisionados em redes de baixa tensão, o que motivou o desenvolvimento de abordagens semissupervisionadas, nas quais instâncias sintéticas de consumo fraudulento são geradas a partir de perfis legítimos, por meio de equações de transformação do comportamento de carga [17].

Uma perspectiva complementar, de natureza topológica, foi explorada por [18], a partir do uso de um algoritmo para detecção e classificação de PNT utilizando medições remotas de tensão e corrente de medidores inteligentes instalados na rede de baixa tensão. No método, compara-se a energia consumida reportada por cada medidor com a energia calculada a partir das impedâncias dos cabos, sendo capaz de identificar derivações clandestinas em segmentos específicos do alimentador. Um aspecto relevante desse trabalho é a necessidade de se conhecer com precisão as impedâncias dos cabos da rede, evidenciando a dependência direta entre a acurácia dos métodos de detecção de PNT e a qualidade da caracterização dos parâmetros elétricos dos cabos.

Essa técnica é eficiente do ponto de vista de gestão, porém depende fortemente de dados e consequentemente de sensoriamento. Além disso, também não trata diretamente o último ponto do processo, que é a análise e estimativa da localização a nível de ramal de serviço.

2.3.3 Técnicas de Reflectometria para Diagnóstico de Cabos

As técnicas de reflectometria constituem uma abordagem de natureza distinta das anteriores, pois atuam diretamente sobre a caracterização física do cabo como meio de propagação de sinais, podendo ser utilizadas no ato da inspeção em campo para identificação da fraude e autuação do fraudador. Em vez de analisar dados de consumo, comparar balanços energéticos ou de precisar de um maior sensoriamento da rede, essas técnicas injetam sinais elétricos de teste no cabo e analisam as reflexões geradas por descontinuidades ou alterações na impedância característica ao longo do condutor. O princípio de operação é análogo ao de um radar: a posição e a natureza de uma anomalia podem ser inferidas a partir do tempo de retorno e da forma do sinal refletido [19].

As principais variantes da reflectometria aplicadas ao diagnóstico de cabos elétricos

são a Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometry*, TDR), a Reflectometria no Domínio da Frequência (*Frequency Domain Reflectometry*, FDR), a Reflectometria com Espectro Espalhado no Domínio do Tempo (*Spread Spectrum Time Domain Reflectometry*, SSTDR) e a Reflectometria no Domínio Tempo-Frequência (*Time-Frequency Domain Reflectometry*, TFDR) [20, 21].

A TDR é a umas das técnicas mais consolidadas e amplamente utilizadas no setor elétrico, principalmente em linhas de transmissão. O princípio de funcionamento consiste na injeção de um pulso de tensão de curta duração no cabo sob teste. Ao encontrar uma descontinuidade de impedância, seja ela um curto-circuito, uma abertura, emenda, derivação ou o próprio final do cabo, parte da energia do pulso é refletida de volta à fonte. A relação entre o coeficiente de reflexão Γ e as impedâncias envolvidas é dada por:

$$\Gamma = \frac{Z_f - Z_0}{Z_f + Z_0}, \tag{2.1}$$

onde Z_0 é a impedância característica do cabo e Z_f é a impedância da descontinuidade. A partir do tempo decorrido entre a emissão do pulso e o retorno do sinal refletido, e conhecendo-se a velocidade de propagação no cabo, é possível calcular a distância até a descontinuidade [19]. A TDR é eficaz na localização de faltas resistivas, aberturas, junções e derivações em cabos de alta, média e baixa tensão, sendo empregada tanto em laboratório quanto em campo.

A SSTDR utiliza sinais pseudoaleatórios de banda larga, o que a torna adequada para aplicação em cabos energizados sem interferir significativamente na operação do sistema [20].

A TFDR combina as vantagens das abordagens temporal e frequencial, aplicando a distribuição de Wigner-Ville para representar a distribuição de energia do sinal refletido simultaneamente no tempo e na frequência, permitindo a detecção de defeitos localizados de isolamento com maior sensibilidade [21].

A FDR, por sua vez, injeta sinais de varredura em frequência ao longo do cabo e aplica a Transformada de Fourier ao sinal refletido, no padrão transitório criado em decorrência das reflexões, para obter o espectro do coeficiente de reflexão [22].

No contexto das redes de distribuição, a aplicação das técnicas de reflectometria estende-se além do diagnóstico de faltas elétricas convencionais. Em [23] é investigada a resposta de ramos curtos de baixa tensão submetidos à TDR convencional e a novas técnicas derivadas, com o objetivo de detectar derivações fraudulentas em linhas de curta extensão. Os resultados demonstraram que a presença de ramais clandestinos introduz descontinuidades de impedância detectáveis pelo método reflectométrico, abrindo caminho para o uso dessa técnica como ferramenta complementar no combate às PNT em redes de baixa tensão [23]. Nesse mesmo sentido, em [18] é demonstrado que o conhecimento preciso

dos parâmetros distribuídos dos cabos (resistência, indutância, capacitância e condutância) por unidade de comprimento é uma condição necessária tanto para a aplicação eficaz de algoritmos de estimação de estado quanto para a interpretação correta dos sinais reflectométricos.

Os comprimentos curtos de cabos encontrados nos ramais de serviço residenciais, impõem desafios no uso de técnicas baseadas em reflectometria. A baixa impedância característica dos cabos utilizados em sistemas de baixa tensão, associada à curta extensão dos condutores, reduz a resolução temporal da TDR convencional e dificulta a distinção entre reflexões genuínas de descontinuidades e artefatos de medição [19, 21]. Ademais, a caracterização precisa dos parâmetros distribuídos desses cabos é frequentemente limitada por restrições de medição, como a ausência de equipamentos de medição dedicados a estas grandezas instalados nos ramais de serviço.

2.3.4 Importância da Estimação de Parâmetros Distribuídos em outras Aplicações da Engenharia Elétrica

Os parâmetros distribuídos de cabos são parâmetros que constituem a entrada fundamental de uma cadeia extensa de ferramentas e sistemas de proteção, simulação e análise de sistemas de potência, de tal forma que erros ou imprecisões na sua caracterização propagam-se diretamente sobre a confiabilidade de cada aplicação subsequente.

No campo da proteção de sistemas elétricos, os relés de distância calculam continuamente a impedância aparente vista em seus terminais e a comparam com os limiares de atuação configurados com base nos parâmetros da linha protegida. Em [24] é explicado como a parametrização incorreta de relés de distância com impedâncias de linha imprecisas é uma das causas diretas de atuações não seletivas, resultando no desligamento de trechos saudáveis da rede [24]. Na localização de faltas, algoritmos baseados em ondas viajantes e em equações de linha utilizam os parâmetros R, L, C e G para calcular a posição da falta a partir dos tempos de chegada dos transitórios, de modo que erros nos parâmetros introduzem diretamente erros métricos na localização [18].

Em análises de fluxo de carga e de curto-circuito, a matriz de admitâncias do sistema ($\mathbf{Y}_{\text{bus}}$) é construída integralmente a partir das impedâncias de linha derivadas dos parâmetros distribuídos, sendo utilizada como dado de entrada obrigatório em qualquer simulador de sistemas de potência, como o ATPDraw, o PSCAD, o OpenDSS, o DIgSILENT PowerFactory, entre outros [25]. Estudos de qualidade de energia, análise harmônica e estabilidade transitória dependem igualmente de modelos de cabo coerentes, uma vez que a resposta em frequência do sistema, a localização de ressonâncias e as sobretensões de manobra são altamente sensíveis aos valores de C e G por unidade de comprimento [26, 27].

A estimação dos parâmetros distribuídos de cabos de baixa tensão constitui uma contribuição tanto para o aprimoramento das técnicas de detecção de PNT quanto para

a melhoria da fidelidade das simulações em programas de simulação. A capacidade de modelar com precisão os parâmetros R, L, C e G por unidade de comprimento de cabos de baixa tensão em ramais de serviço acrescenta um elo entre as metodologias de diagnóstico físico discutidas nesta seção e as ferramentas computacionais empregadas no planejamento e operação das redes de distribuição modernas.

Embora os ramais de serviço de baixa tensão operem em condições distintas das linhas de transmissão de alta tensão, os princípios físicos que governam a propagação de tensão e corrente ao longo de qualquer condutor são os mesmos. A teoria das linhas de transmissão, desenvolvida ao longo de décadas para a modelagem de sistemas de alta tensão, constitui, portanto, a base matemática sólida para modelagem de cabos de baixa tensão. A compreensão dos limites de validade de cada modelo, concentrado ou distribuído, e da dependência desses limites com a frequência do sinal, é condição necessária para se avaliar de forma rigorosa até que ponto as equações clássicas da linha de transmissão podem ser aplicadas, com as devidas adaptações, aos segmentos da ordem de metros que caracterizam os ramais de serviço de baixa tensão investigados neste trabalho.

2.4 DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

A categorização das linhas de transmissão em sistemas de potência vai além da simples medida da distância geográfica. Ainda que esta seja uma variável de grande relevância, ela compõe apenas uma parte da análise do comportamento da onda eletromagnética ao longo do condutor. Conforme elucidado por [28], a propagação de tensão e corrente não é instantânea, ocorrendo a uma velocidade finita próxima à da luz. A classificação da linha, portanto, define se o tempo de propagação da onda é negligenciável, permitindo o uso de modelos de parâmetros concentrados, ou significativo, exigindo modelos de parâmetros distribuídos em relação ao período da frequência de operação.

Esta interdependência temporal implica que a classificação de uma linha como curta ou longa não é estática, sendo inversamente proporcional à frequência do sinal. A condição de validade para modelos concentrados é regida pela relação do comprimento da linha e do comprimento de onda $l \ll \lambda$, em que o comprimento de onda λ é definido pela Equação 2.2:

$$\lambda = \frac{v}{f}. \tag{2.2}$$

Em que:

- λ é o comprimento de onda em metros (m);
- v é a velocidade de propagação da onda no meio em metros por segundo (m/s);

- f é a frequência de operação do sinal em Hertz (Hz).

Consequentemente, à medida que a frequência f aumenta o comprimento de onda λ diminui drasticamente. Isso significa que um segmento de cabo fisicamente curto (poucos metros) pode comportar-se como uma linha eletricamente longa [1]. A literatura técnica, corroborada por [29], estabelece limites práticos de comprimento para selecionar o modelo matemático que equilibra precisão e complexidade computacional para caracterizações fidedignas.

2.4.1 Linhas Longas

São consideradas linhas de transmissão longas quando seu comprimento é superior a 250 km [28](quando tendo somente o comprimento como variável de análise). Nestes casos, a simplificação de parâmetros concentrados falha, pois a distribuição contínua de resistência (R), indutância (L), capacitância (C) e condutância (G) ao longo do espaço causa uma variação não linear de tensão e corrente.

2.4.1.1 Parâmetros Distribuídos

A análise exige o tratamento da linha como um guia de ondas. Segundo Olsen [28], aplica-se a solução da equação da onda (equação do telégrafo) no domínio da frequência. A tensão em qualquer ponto x é uma superposição de ondas incidentes e refletidas, governadas pela constante de propagação (γ):

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \tag{2.3}$$

onde α é a constante de atenuação e β a constante de fase. As equações exatas que relacionam os fasores nos terminais de envio (s) e recepção (r) utilizam funções hiperbólicas:

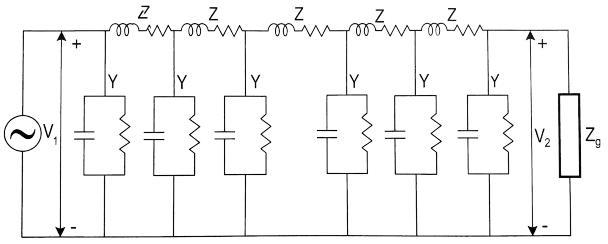
$$\widehat{V}_s = \widehat{V}_r \cosh(\gamma l) + \widehat{I}_r Z_c \sinh(\gamma l), \tag{2.4}$$

$$\widehat{I}_s = \widehat{I}_r \cosh(\gamma l) + \frac{\widehat{V}_r}{Z_c} \sinh(\gamma l). \tag{2.5}$$

Ainda em [1], destaca-se a importância fundamental da impedância característica ($Z_c = \sqrt{Z/Y}$) nesta formulação. Em análises transitórias ou de alta frequência, Z_c representa a relação entre as ondas de tensão e corrente, sendo um parâmetro real para linhas sem perdas, mas complexo para cabos reais.

Ilustra-se na Figura 2 o modelo físico fundamental de parâmetros distribuídos de linhas longas.

Figura 2 – Modelo de parâmetros distribuídos para linhas longas, adaptado de [1].



2.4.2 Linhas Médias

Na literatura, as linhas médias normalmente compreendem o intervalo entre 80 km e 250 km [30], variando conforme o nível de tensão da linha.

2.4.2.1 Modelagem Matemática e Contexto Físico:

O modelo nominal π é o padrão da indústria [29], onde a admitância total (Y) é dividida em duas metades nas extremidades da linha.

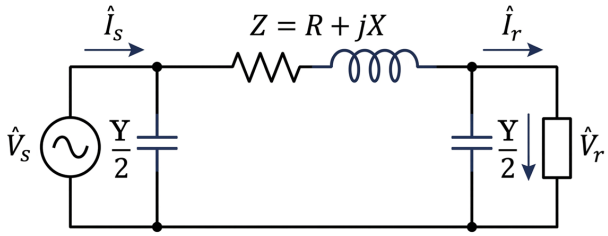
As equações de duas portas (ABCD) para este modelo são:

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_s \\ \widehat{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z \\ Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & 1 + \frac{ZY}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_r \\ \widehat{I}_r \end{bmatrix}. \tag{2.6}$$

Esta topologia é preferida pois facilita a integração direta na matriz de admitância nodal (Y_{bus}), essencial para algoritmos iterativos de fluxo de potência.

A representação esquemática desta formulação matemática é ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Modelo matemático de impedância série para linhas médias.



Fonte: Adaptado pelo autor de [1].

A nomenclatura π - nominal deriva da topologia do circuito, que se assemelha à letra grega: a impedância série total (Z) compõe o ramo longitudinal central, enquanto a admitância *shunt* total é bifurcada em dois ramos transversais idênticos de valor $Y/2$, conectados às barras de envio e recepção. Esta alocação estratégica da capacitância nas extremidades é o artifício que permite modelar a diferença de corrente entre o início e o fim da linha ($I_s \neq I_r$) mantendo a simetria do quadripolo, o que simplifica substancialmente os cálculos de fluxo de carga em comparação aos modelos distribuídos.

2.4.3 Linhas Curtas

Classificam-se como curtas as linhas com comprimento físico inferior a 80 km [30], porém isso pode variar dependendo da avaliação da linha que o modelo deve representar. Todavia, nesta escala de comprimento de linha, para a frequência alternada padrão (50/60 Hz) de transmissão, o comprimento da linha é uma fração muito pequena do comprimento de onda.

2.4.3.1 Modelagem Matemática e Contexto Físico:

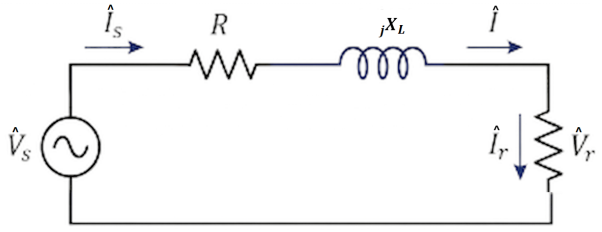
Devido à curta distância, a corrente de fuga através da capacitância *shunt* (C) e da condutância (G) é ínfima comparada à corrente de carga. Greenwood [1] explica que, neste regime, a energia armazenada no campo elétrico é desprezível em relação à dissipação resistiva e ao armazenamento magnético. Assim, a linha é modelada como uma impedância série concentrada ($Z = R + j\omega L$), onde $\widehat{I}_s = \widehat{I}_r$.

A relação fasorial simplificada é dada por:

$$\widehat{V}_s = \widehat{V}_r + \widehat{I}_r(R + jX_L). \tag{2.7}$$

Reflete-se na Figura 4 a predominância absoluta dos efeitos longitudinais sobre os transversais: a linha é reduzida a um único ramo série, composto pela resistência ôhmica (R) e pela reatância indutiva (X_L). A ausência gráfica de componentes conectados ao terra (capacitores ou condutâncias) ilustra a premissa física fundamental de que a corrente que deixa o terminal de envio ($\widehat{I}_s$) alcança o terminal de recepção ($\widehat{I}_r$) sem sofrer atenuação por fugas laterais, consolidando a relação de continuidade de corrente expressa matematicamente.

Figura 4 – Modelo matemático de impedância série para linhas curtas.



Fonte: Fonte: Adaptado pelo autor de [1].

Os modelos apresentados até então, de linhas longas, médias e curtas, foram concebidos e validados para as escalas geográficas e os níveis de tensão que historicamente dominaram os estudos de sistemas de potência. À medida que o escopo de análise se desloca das linhas de transmissão convencionais para os segmentos terminais da rede elétrica, os pressupostos que sustentam cada modelo são progressivamente desafiados. Em

ramais de serviço de baixa tensão, cujos comprimentos são da ordem de poucos metros, nenhum dos três regimes de modelagem é diretamente aplicável sem ressalvas: a linha é fisicamente curta, o que sugeriria o modelo concentrado, mas os sinais de alta frequência necessários para a estimação de parâmetros impõem comprimentos de onda comparáveis à extensão do condutor, reintroduzindo a necessidade de tratamento distribuído. Essa dualidade define o cerne dos desafios metodológicos discutidos a seguir.

2.5 DESAFIOS DO USO DOS MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM CENÁRIOS DE BAIXA TENSÃO

A transição da análise de linhas de transmissão de longa extensão para a escala dos ramais de serviço de distribuição implica não apenas uma mudança quantitativa de escopo, mas uma mudança profunda nos fundamentos da observabilidade do sistema. Enquanto em linhas de transmissão de alta tensão as quedas de tensão ao longo do condutor são expressivas e de fácil medição, em distâncias da ordem de poucos metros a impedância reduzida do condutor resulta em diferenciais de tensão (ΔV) de magnitude comparável à incerteza intrínseca dos próprios instrumentos de medição. Neste cenário, a aplicação direta das equações clássicas de linha sobre medições convencionais torna-se numericamente instável, requerendo pré-processamento robusto e filtros de estimação capazes de separar o sinal de interesse dos artefatos de medição. Conforme investigado por [31], a relação sinal-ruído em medições reais de redes de baixa tensão frequentemente apresenta valores discrepantes (*outliers*), o que degrada severamente a precisão de estimadores determinísticos simples, exigindo abordagens estatísticas robustas para a regularização dos dados.

O Brasil adota um modelo de distribuição secundária que apresenta características próximas ao padrão europeu, porém com particularidades normativas próprias. A rede de baixa tensão brasileira opera nos níveis de 127/220 V (sistema monofásico com neutro) e 220/380 V (sistema trifásico a quatro fios), ambos regulamentados pela ANEEL e detalhados nas normas técnicas das distribuidoras, em conformidade com a ABNT NBR 8182 e com os padrões de projetos e materiais de cada concessão [32, 33]. A construção das redes secundárias brasileiras é predominantemente aérea, com cabos de alumínio multiplexados autossustentados, isolados com polietileno reticulado, nos quais os condutores de fase são retorcidos helicoidalmente ao redor do neutro mensageiro, que funciona simultaneamente como elemento de sustentação mecânica e condutor elétrico [32, 34, 35]. A topologia mais comum nas áreas urbanas é a radial ramificada, em que o transformador de distribuição alimenta um barramento secundário a partir do qual derivam os alimentadores de baixa tensão, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Trafo de distribuição e as linhas das redes de média e baixa tensão.



Ilustra-se na Figura 5 a coexistência física dos dois níveis de distribuição em um poste urbano típico brasileiro: a rede primária de distribuição em média tensão, conduzida pelos cabos superiores destacados em vermelho, e a rede secundária de baixa tensão, identificada pelos condutores multiplexados inferiores destacados em amarelo, partindo diretamente do lado secundário do transformador. Essa proximidade física entre os dois níveis e a disposição compacta dos cabos multiplexados ao longo da calha do poste são características determinantes da topologia construtiva brasileira e impõem ao sistema de baixa tensão uma interface de derivação direta com os ramais de serviço dos consumidores.

2.5.1 O Ramal de Serviço Individual

O nível mais capilar da rede de distribuição brasileira é o ramal de serviço individual, segmento que conecta eletricamente a rede secundária ao ponto de entrega do consumidor, onde está instalado o medidor de energia. Conforme estabelecido pelas normas de distribuição das concessionárias brasileiras, esses ramais possuem comprimentos que variam desde poucos metros até, no máximo, 40 m, sendo constituídos por cabos de cobre ou alumínio em configurações monofásica (dois condutores: fase e neutro), bifásica (três condutores: duas fases e neutro) ou trifásica (quatro condutores: três fases e neutro), a depender da classe de tensão e da potência contratada pelo consumidor [33]. Apresenta-se na Figura 6 um exemplo real de ramais monofásicos de baixa tensão em área urbana.

Figura 6 – Ramais de entradas monofásicos.



Evidencia-se na Figura 6 dois aspectos estruturais de relevância direta para o presente trabalho. O primeiro é a conexão elétrica entre a rede secundária de baixa tensão, representada pelos cabos multiplexados no poste ao fundo à esquerda, e os ramais monofásicos individuais que derivam em direção aos pontos de medição das unidades consumidoras. O segundo aspecto, destacado na imagem pela marcação da pequena distância entre o ramal e o medidor, ilustra de forma contundente a ordem de grandeza das extensões envolvidas: trata-se de cabos com comprimentos da ordem de metros, por vezes inferiores a dez metros, o que contrasta radicalmente com os pressupostos de distância habitualmente adotados nos modelos clássicos de parâmetros distribuídos de cabos elétricos.

2.5.2 Implicações Metrológicas e de Modelagem em Cabos de Curta Extensão

A curta extensão dos ramais de serviço de baixa tensão impõe limitações severas aos métodos de estimação de parâmetros e às técnicas de análise por reflectometria. Essas limitações decorrem, fundamentalmente, da interação entre as propriedades físicas do cabo, da resolução dos instrumentos de medição e das características do regime eletromagnético em cabos curtos.

Do ponto de vista de estimação de parâmetros, a impedância longitudinal de um condutor de cobre de seção $6\,\mathrm{mm}^2$ em um ramal de $5\,\mathrm{m}$ é da ordem de poucos miliohmns. Isso implica que as quedas de tensão observáveis nos terminais do ramal, na frequência fundamental de $60\,\mathrm{Hz}$, são da mesma magnitude ou até inferiores à resolução e à incerteza combinada dos instrumentos de medição disponíveis em campo. Mesmo

com o uso de analisadores de qualidade de energia de alta precisão, os diferenciais de tensão mensuráveis nesses segmentos podem estar abaixo do limiar de detecção prática, inviabilizando abordagens diretas de estimação de parâmetros baseadas em medições de regime permanente [18, 31].

Do ponto de vista das técnicas de reflectometria, a limitação é igualmente crítica. Para cabos de polietileno reticulado, a velocidade de propagação é tipicamente da ordem de 65% a 70% da velocidade da luz, que é de aproximadamente 3×10^8 m/s no vácuo [36]. Em um ramal de 5 m, o tempo de propagação de ida e volta de um pulso é da ordem de:

$$\Delta t = \frac{2\ell}{v_p} = \frac{2 \times 5}{0{,}65 \times 3 \times 10^8} \approx 51\,\text{ns}. \tag{2.8}$$

Este intervalo de tempo é pequeno e exige instrumentação com largura de banda da ordem de grandeza de centenas de megahertz e taxas de amostragem na faixa de gigasamples por segundo para que as reflexões provenientes de descontinuidades localizadas em diferentes posições ao longo do ramal possam ser distinguidas [19, 20]. Instrumentos de uso convencional em campo, concebidos para localização de faltas em cabos de média e alta tensão com centenas ou milhares de metros, não possuem resolução temporal suficiente para discriminar reflexões em distâncias da ordem de metros, tornando direta a aplicação de TDR convencional tecnicamente inviável nesses segmentos.

A adoção de simulações computacionais em programas de análise de transitórios eletromagnéticos emergem como uma estratégia a essas limitações de medições, tanto para a calibração dos algoritmos de estimação de parâmetros quanto para a validação das metodologias propostas em condições controladas, antes de sua aplicação sobre dados reais de campo. O ambiente computacional permite a geração de cenários sintéticos com parâmetros previamente conhecidos, a imposição controlada de ruído e incertezas de medição e a análise sistemática da sensibilidade dos estimadores a variações dos parâmetros do cabo, sem as restrições operacionais inerentes aos ensaios em campo.

2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Na seção anterior, mostra-se que a estimação de parâmetros distribuídos em cabos de baixa tensão de curta extensão é condicionada por dois conjuntos de restrições simultâneas: as limitações físicas decorrentes da baixa observabilidade das grandezas elétricas nos segmentos curtos e as limitações metrológicas dos instrumentos de medição disponíveis. Esses dois conjuntos de restrições convergem para um problema metodológico: a dificuldade de calibrar e validar um algoritmo de estimação de parâmetros em um ambiente no qual os valores verdadeiros das grandezas do cabo são, por princípio, desconhecidos e de difícil determinação experimental direta.

Em medições de campo, a incerteza combinada dos instrumentos, a variabilidade das condições de carga e a interferência do ambiente elétrico ao redor dos cabos impedem o estabelecimento de uma referência absoluta para o cálculo do erro de estimação [37]. Qualquer comparação entre o valor estimado pelo algoritmo e um valor de referência obtido em campo estará, inevitavelmente, contaminada pelas mesmas fontes de erro que o algoritmo se propõe a tratar. Para superar essa limitação e garantir rigor científico ao processo de avaliação do estimador, a simulação computacional de transitórios eletromagnéticos constitui uma etapa importante de validação com parâmetros controlados.

2.6.1 O Programa ATPDraw como Ambiente de Simulação

O *Alternative Transients Program* (ATP), com sua interface gráfica ATPDraw, é um programa consagrado para a simulação digital de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em sistemas de potência, amplamente utilizado pela comunidade científica e pela indústria elétrica em todo o mundo. A ferramenta de cálculo principal do programa é fundamentada em soluções de cálculo numérico, voltadas para representação de componentes de circuitos elétricos [38]. Essa formulação, consolidada ao longo de décadas de desenvolvimento colaborativo internacional pela *Canadian/American EMTP User Group* e pelo *European EMTP-ATP Users Group* (EEUG), permite a representação de uma ampla gama de fenômenos, desde transitórios de chaveamento e sobretensões atmosféricas até regimes quasi-permanentes com múltiplas frequências [25].

Do ponto de vista da modelagem de cabos, o ATPDraw disponibiliza rotinas de cálculo de parâmetros de linha capazes de determinar, a partir de dados geométricos e materiais do cabo, os parâmetros distribuídos R, L, C e G por unidade de comprimento em função da frequência. Os modelos de linha podem ser representados por seções π concentradas, por modelos de parâmetros distribuídos com propagação no domínio do tempo ou por modelos de linha com parâmetros dependentes da frequência [25].

A disponibilidade do ATP por meio de licença acadêmica e a sua vasta base de casos validados em aplicações industriais e acadêmicas conferem-lhe credibilidade como plataforma de referência para a geração dos dados sintéticos de calibração utilizados neste trabalho [25]. O princípio metodológico subjacente no uso do ATP/ATPDraw é direto: ao construir um modelo de cabo com parâmetros distribuídos *a priori* conhecidos em um ambiente de simulação, é possível gerar formas de onda sintéticas de tensão e corrente nos terminais do cabo com qualquer nível de ruído, assimetria de carga ou condição operacional desejada. Essas formas de onda sintéticas são então submetidas ao algoritmo de estimação exatamente como o seriam dados reais de campo, e o resultado estimado é comparado com os parâmetros inseridos no modelo, cujos valores são conhecidos com precisão arbitrária. Essa abordagem garante que o erro de estimação calculado reflita exclusivamente o desempenho do estimador, e não a imprecisão da referência de campo [31].

3 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO

Detalha-se nesta seção a abordagem metodológica proposta para superar os desafios descritos em torno da estimação de parâmetros de cabos de baixa tensão. A estratégia central baseia-se na reconstrução de modelos de parâmetros elétricos, considerando cenários em que os cabos estariam submetidos a sinais de frequências mais altas, a partir de dados de simulação, para validar a utilização de técnicas de processamento de sinais para a extração de fasores e comparar a eficácia de duas formulações matemáticas para a estimação paramétrica: a matriz de admitância e a matriz de transmitância.

O objetivo central é analisar o comportamento e a estabilidade numérica de ambas as formulações quando aplicadas a segmentos de linha eletricamente ultra-curtos e sujeitos a ruído, avaliando se o método via transmitância apresenta, de fato, a robustez necessária para superar as limitações de condicionamento observadas na formulação clássica.

3.1 ESTIMAÇÃO DE FASORES SINCRONIZADOS

O ponto de partida para qualquer algoritmo de caracterização é a conversão das formas de onda no domínio do tempo, $v(t)$ e $i(t)$, obtidas por oscilografia ou simulação,para o domínio da frequência. A precisão desta etapa é determinante, pois erros na magnitude ou, principalmente, no ângulo de fase, propagam-se linearmente para a estimativa dos parâmetros do cabo [39].

Neste trabalho, a extração fasorial é realizada através da Transformada Discreta de Fourier (DFT) [40], aplicada sobre uma janela de dados estacionária. Considerando um sinal discreto $x[n]$ amostrado a uma frequência f_s, o fasor X_k correspondente à frequência fundamental (ou harmônica de interesse) f_k é calculado por:

$$X_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \tag{3.1}$$

onde N é o número de amostras na janela de observação. Para garantir a coerência espectral e evitar o vazamento, a janela de amostragem é sincronizada para conter um número inteiro de ciclos da frequência fundamental. A saída deste processamento fornece os vetores complexos de tensão e corrente $(\widehat{V}_s, \widehat{I}_s)$ no terminal de envio e $(\widehat{V}_r, \widehat{I}_r)$ no terminal de recepção, que servem como dados de entrada para os estimadores caixa-preta detalhados a seguir.

3.2 MODELAGEM CAIXA-PRETA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

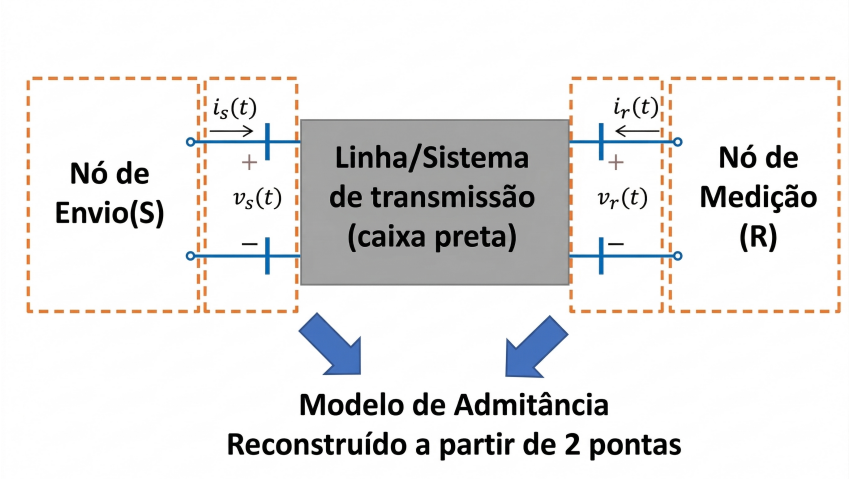
A caracterização proposta adotará uma abordagem de modelagem caixa-preta, conforme o trabalho de [41]. Esta abordagem reconstrói o modelo matemático exclusiva-

mente a partir das respostas medidas nos terminais dos condutores, e então serão avaliadas utilizando dois métodos de estimação de parâmetros: o de admitância e o de transmitância.

3.2.1 Método da Matriz de Admitância Nodal

A Matriz de Admitância (Y) é uma ferramenta bastante conhecida para análise de fluxo de potência em regime permanente. Em [41] é apresentada uma abordagem matemática conjunta para melhorar a acurácia dessa teoria para aplicação voltada para reconstrução de modelos e uso em análise de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão. No estudo, a aplicação para a caracterização de linhas baseia-se na teoria de quadripolos, onde a linha é vista como um elemento de circuito π que conecta dois nós. É possível ver na Figura 7 como é o modelo caixa preta e quais as grandezas necessárias pra sua estimação:

Figura 7 – Diagrama de medição e da obtenção do modelo de matriz de admitância.



Fonte: Adaptado de [41].

A matriz de admitância nodal fornece a estrutura matemática padrão para descrever essa relação em regime permanente. Conforme detalhado por [41], para um sistema genérico, a Lei de Kirchhoff das Correntes aplicada aos nós terminais estabelece que o vetor de correntes injetadas (I) é o produto da matriz de admitância pelo vetor de tensões nodais (V):

$$\begin{bmatrix} \widehat{I}_s \\ \widehat{I}_r \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{bus} \begin{bmatrix} \widehat{V}_s \\ \widehat{V}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ss} & Y_{sr} \\ Y_{rs} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_s \\ \widehat{V}_r \end{bmatrix}. \tag{3.2}$$

Expandindo este sistema matricial, são obtidas duas equações lineares fundamentais que descrevem o comportamento da linha:

$$\begin{cases} \widehat{I}_s = Y_{ss}\widehat{V}_s + Y_{sr}\widehat{V}_r \\ \widehat{I}_r = Y_{rs}\widehat{V}_s + Y_{rr}\widehat{V}_r, \end{cases} \tag{3.3}$$

onde:

- Y_{ss} e Y_{rr} são as Admitâncias Próprias dos nós de envio e recepção, respectivamente;
- Y_{sr} e Y_{rs} são as Admitâncias de Transferência mútuas entre os nós.

O desafio matemático para a caracterização reside no fato de que uma única medição fornece apenas duas equações para quatro incógnitas (os quatro elementos de $\mathbf{Y}$). Para solucionar o sistema, é necessário obter um segundo conjunto de medições linearmente independente.

Agrupando essas duas medições, constroem-se matrizes quadradas de Corrente ($\mathbf{I}_m$) e Tensão ($\mathbf{V}_m$) 2×2:

$$\mathbf{I}_m = \begin{bmatrix} I_s^{(1)} & I_s^{(2)} \\ I_r^{(1)} & I_r^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_m = \begin{bmatrix} V_s^{(1)} & V_s^{(2)} \\ V_r^{(1)} & V_r^{(2)}. \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Assim, a equação matricial expandida torna-se:

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{Y}_{bus} \cdot \mathbf{V}_m. \tag{3.5}$$

Finalmente, isolando-se a matriz de interesse, obtém-se a solução direta para os parâmetros nodais através da inversão da matriz de tensões medidas:

$$\mathbf{Y}_{bus} = \mathbf{I}_m \cdot \mathbf{V}_m^{-1}. \tag{3.6}$$

Para uma linha de transmissão uniforme e passiva, a matriz resultante deve ser simétrica, onde $Y_{sr} = Y_{rs}$ e, pela simetria longitudinal do cabo, $Y_{ss} = Y_{rr}$. Esta propriedade serve como um indicador de qualidade da estimação: desvios significativos da simetria indicam erros de medição ou não-linearidades no componente testado.

3.2.1.1 Extração de Parâmetros via Admitância

O processo de estimação consiste em resolver este sistema linear para encontrar os elementos de $\mathbf{Y}$. Uma vez obtida a matriz numérica para uma dada frequência ω, os parâmetros distribuídos fundamentais, constante de propagação (γ) e impedância característica (Z_c) podem ser derivados analiticamente. Em [41] é demonstrado que, para uma linha de comprimento l, as relações são:

$$\cosh(\gamma l) = -\frac{Y_{ss}}{Y_{sr}}. \tag{3.7}$$

$$Z_c = -\frac{1}{Y_{sr}\sinh(\gamma l)}. \tag{3.8}$$

A partir de γ e Z_c, isolam-se os parâmetros elétricos por unidade de comprimento:

$$z = R + j\omega L = Z_c \cdot \gamma \quad \text{e} \quad y = G + j\omega C = \frac{\gamma}{Z_c}. \tag{3.9}$$

3.2.1.2 Limitações em Cabos Curtos

Embora robusta para linhas longas, a formulação via matriz de admitância é muito suscetível a erros quando aplicada a linhas curtas em 60 Hz. Isso ocorre porque, em trechos curtos, a queda de tensão série ($\widehat{V}_s - \widehat{V}_r$) é muito pequena e a corrente de fuga transversal (I_{shunt}) é muito pequena. Matematicamente, isso faz com que a matriz Y torne-se mal condicionada: os valores de $\widehat{V}_s$ e $\widehat{V}_r$ podem se tornar próximos, levando a uma subtração de números grandes com resultado pequeno no denominador, amplificando o ruído de medição na estimativa final.

3.2.2 Método da Matriz de Transmitância (ABCD)

Para contornar o problema de condicionamento numérico inerente à matriz de admitância em linhas curtas, em [42]: em vez de relacionar injeções de corrente com tensões nodais, utiliza-se a Matriz de Transmitância ($\mathbf{T}$). Esta abordagem, análoga à matriz ABCD clássica(parâmetros tipicamente de linhas longas, como na teoria de quadripolos), modela a linha como uma cascata causal, onde as grandezas do terminal de envio ($\widehat{V}_s, \widehat{I}_s$) são expressas como função direta das grandezas do terminal de recepção ($\widehat{V}_r, \widehat{I}_r$).

A equação fundamental que rege este modelo é expressa por:

$$\begin{bmatrix} \widehat{V}_s \\ \widehat{I}_s \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \widehat{V}_r \\ \widehat{I}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{V}_r \\ \widehat{I}_r \end{bmatrix}, \tag{3.10}$$

onde os sub-blocos da matriz $\mathbf{T}$ encapsulam a física de propagação da onda através das funções hiperbólicas:

- $\mathbf{A} = \cosh(\gamma l)$: Representa o ganho de tensão em vazio (adimensional);
- $\mathbf{B} = Z_c \sinh(\gamma l)$: Representa a impedância de transferência de curto-circuito (Ω);
- $\mathbf{C} = Y_c \sinh(\gamma l)$: Representa a admitância de transferência (S);
- $\mathbf{D} = \cosh(\gamma l)$: Representa o ganho de corrente em curto-circuito (adimensional).

3.2.2.1 Aplicação da matriz de Transmitância Passo a Passo

A implementação no trabalho mencionado é executada em duas etapas: a reconstrução numérica da matriz **T** e, subsequentemente, a extração analítica dos parâmetros.

Passo 1: Construção das Matrizes de Medição

Assim como no método da admitância, uma única medição instantânea é insuficiente para resolver o sistema, pois há mais incógnitas do que equações. É necessário obter dois conjuntos de fasores independentes. Organizam-se então duas matrizes de dados, uma para as grandezas de entrada ($\mathbf{M}_{in}$) e outra para as de saída ($\mathbf{M}_{out}$) [42]:

$$\mathbf{M}_{in} = \begin{bmatrix} V_s^{(1)} & V_s^{(2)} \\ I_s^{(1)} & I_s^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_{out} = \begin{bmatrix} V_r^{(1)} & V_r^{(2)} \\ I_r^{(1)} & I_r^{(2)} \end{bmatrix}. \tag{3.11}$$

Passo 2: Inversão Matricial

A relação linear do sistema pode ser reescrita como $\mathbf{M}_{in} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{M}_{out}$. A matriz de transmitância é obtida isolando **T** através da pós-multiplicação pela inversa da matriz de saída:

$$\mathbf{T}_{estimada} = \mathbf{M}_{in} \cdot \mathbf{M}_{out}^{-1}. \tag{3.12}$$

Esta operação de inversão é significativamente mais estável numericamente para linhas curtas do que a inversão de diferenças de tensão exigida pelo método da admitância.

3.2.2.2 Maior Estabilidade em Cabos Curtos

A superioridade deste método para linhas curtas reside no comportamento das funções hiperbólicas quando o argumento γl tende a zero, condição que caracteriza linhas eletricamente curtas [43]. Para $|\gamma l| \ll 1$, a expansão da matriz T na Série de Taylor de primeira ordem da função seno hiperbólico é:

$$\sinh(\gamma l) = \gamma l + \frac{(\gamma l)^3}{6} + \cdots \approx \gamma l, \tag{3.13}$$

de modo que o produto $\mathbf{Z}_l \mathbf{Y}_l \approx \mathbf{0}$, condição verificada por [43] para linhas com comprimento inferior a 80 km e adotada por [42] como fundamento do modelo de Transmitância, chamado de *T-line* pelo autor. Substituindo a aproximação (3.13) nos termos da matriz de transmitância **T**, observa-se o desacoplamento natural dos parâmetros longitudinais e transversais:

- O termo **B** converge diretamente para a impedância série total:

$$\mathbf{B} = Z_c \sinh(\gamma l) \approx \sqrt{\frac{z}{y}} \cdot \sqrt{zy} \cdot l = z \cdot l = R_{\text{total}} + j\omega L_{\text{total}}, \tag{3.14}$$

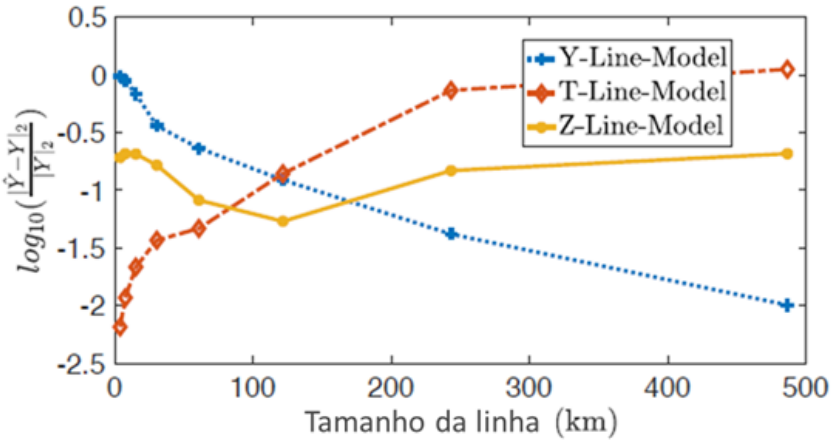
- O termo $\mathbf{C}$ converge para a admitância shunt total:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{Z_c}\sinh(\gamma l) \approx \sqrt{\frac{y}{z}} \cdot \sqrt{zy} \cdot l = y \cdot l = G_{\text{total}} + j\omega C_{\text{total}}, \tag{3.15}$$

onde z e y são, respectivamente, a impedância e a admitância por unidade de comprimento, e $Z_c = \sqrt{z/y}$ é a impedância característica do cabo [42,43]. As aproximações (3.14) e (3.15) evidenciam que, para linhas curtas, os parâmetros $\mathbf{Z}_l$ e $\mathbf{Y}_l$ podem ser estimados de forma independente entre si, o que reduz a sensibilidade ao ruído de medição em comparação com os modelos Admitância (Y-Model) e Impedãncia de linha (Z-model), nos quais a impedância série precisa ser calculada indiretamente pela diferença de tensões nodais muito próximas ($V_s - V_r \approx 0$), operação que amplifica drasticamente o erro de medição pelo fenômeno do cancelamento catastrófico [42].

Por outro lado, no método da Transmitância, a impedância série aparece explicitamente isolada no elemento $\mathbf{B}$ (ou $\mathbf{T}_{12}$). Como demonstrado em [42], o erro na estimativa de R e L usando a transmitância permanece limitado e constante mesmo quando o comprimento da linha tende a zero, enquanto o erro via admitância diverge exponencialmente para o infinito, conforme ilustrado na análise de sensibilidade da Figura 8.

Figura 8 – Evolução do erro relativo na estimação de parâmetros entre diferentes métodos.



Fonte: Adaptado de [42].

Apresenta-se na Figura 8 a evolução do erro relativo de estimação em escala logarítmica em função do comprimento da linha para os três modelos avaliados por [42]. O modelo Z-line mantém erro intermediário e relativamente estável ao longo de toda a faixa analisada, sem apresentar vantagem clara em nenhum regime. O modelo Y-line, baseado na matriz de admitância, exibe o menor erro para linhas de pequena extensão, tornando-se progressivamente pior à medida que o comprimento cresce. O comportamento oposto é observado no modelo T-line, baseado na matriz de transmitância: para linhas curtas o erro é comparativamente elevado, mas decresce de forma consistente com o aumento do comprimento, atingindo os menores valores a partir de aproximadamente 200 km. Além

disso, [42] cita que o modelo de transmitância mesmo em curtas distâncias se mantém mais estável na presença de ruídos do que o de Admitância. Essa dualidade de comportamento entre os modelos Y-line e T-line, com regiões de dominância distintas e complementares, fundamenta a escolha desses dois modelos como objeto central do estudo comparativo desenvolvido neste trabalho, avaliados tanto em cenários sem ruído quanto sob condições realistas de incerteza de medição.

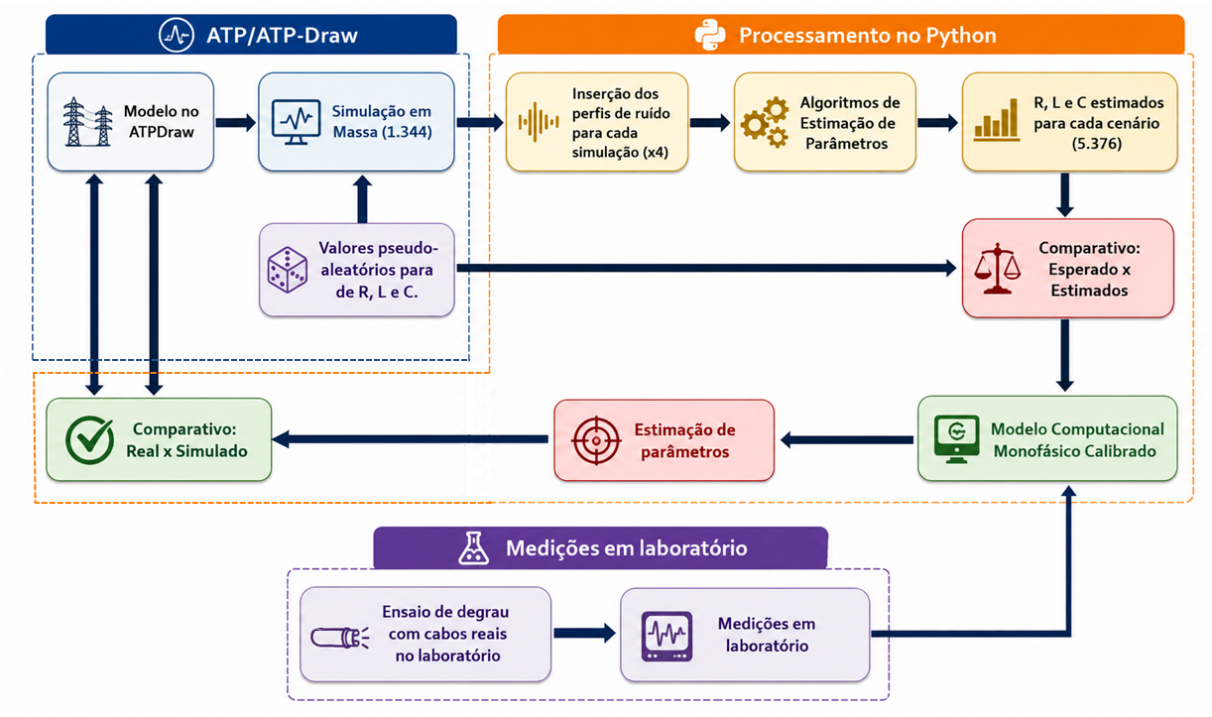
3.2.3 Análise Comparativa de Estabilidade Numérica e Propagação de Erros

A seleção de um algoritmo de estimação de parâmetros não deve basear-se apenas na exatidão algébrica das equações, mas também na sua robustez frente às incertezas inerentes ao processo de medição. Embora as formulações via Matriz de Admitância (Y) e Matriz de Transmitância (T) sejam teoricamente equivalentes, ambas derivadas das mesmas equações dos telegrafistas, seu comportamento numérico diverge drasticamente quando aplicadas a segmentos de linha eletricamente curtos, característicos das redes de distribuição secundárias. Em contrapartida, conforme pode ser visto na Figura 8, para linhas ultra-curtas, menores que 1 km por exemplo, a matriz de admitância teoricamente apresentou erro próximo de zero enquanto que a de transmitância apresentou o maior erro em curtas distâncias (1%), reforçando ainda mais a contribuição deste trabalho.

4 PROCESSAMENTO PARA ESTIMAÇÃO DE GRANDEZAS

Baseando-se nos trabalhos de [41] e [42], este trabalho avalia as duas abordagens numéricas para estimação de fasores e cálculo de grandezas de parâmetros distribuídos em cabos de baixa tensão, na configuração monofásica. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo para o processamento de medições de tensão e corrente realizadas nas extremidades dos cabos, tornando os valores nominais de R,L e C dos cabos uma "caixa preta". Utilizando essas medições, o algoritmo deve processá-las, calcular os fasores e aplicar os valores nas matrizes de Admitância e Transmitância, para chegar a valores estimados dos parâmetros distribuídos. Como ferramenta de simulação, foi utilizado o ATP/ATPDraw para obtenção das medições de tensão e corrente, já que em ambiente virtual é possível validar o funcionamento do algoritmo de forma isolada de fatores aleatórios e inerentes às medições, como ruídos e acoplamentos de instrumentos de medição indesejados. Dessa forma, espera-se calibrar o algoritmo via simulação e em seguida utilizar esse modelo para estimar grandezas com medições de tensões e correntes vindas de cabos reais. Este passo a passo do processo proposto pode ser observado no diagrama na Figura 9, cujos blocos são detalhados a seguir.

Figura 9 – Diagrama geral da abordagem computacional proposta.



- Modelo no ATP/ATPDraw
  O ponto de partida da metodologia é a construção de um modelo de circuito monofásico no ambiente ATP/ATPDraw. O modelo serve como referência controlada

para a geração das formas de onda simuladas utilizadas na calibração do algoritmo de estimação.

- Geração de valores pseudo-aleatórios de R, L e C
  Em paralelo à construção do modelo, um algoritmo externo gera, conjuntos de 1344 valores distintos para cada parâmetro elétrico, dentro de intervalos pré-definidos. Esses valores são inseridos sequencialmente no modelo, preservando a perspectiva de caixa-preta para o algoritmo de processamento.

- Simulação em massa (1344 cenários)
  O ATP/ATPDraw executa 1344 rodadas de simulação em série, uma para cada combinação de valores de R, L e C. Em cada rodada, são registradas as formas de onda de tensão e corrente nos dois terminais do cabo, sob excitação senoidal de 10 V_{pp} a 60 kHz, totalizando um banco de dados controlado com parâmetros conhecidos para conferência posterior. Vale salientar que este número de simulações foi decorrente de uma limitação computacional da ferramenta de simulação em série do ATP/ATPDraw e da máquina disponível. A ferramenta só conseguiu executar com sucesso 112 simulações por núcleo, considerando que a máquina disponível possui 12. Ao aumentar o número de simulações por núcleo, o programa retorna erro de memória insuficiente (a máquina utilizada para simulações possui 64 GB de memória RAM).

- Inserção dos perfis de ruído
  Sobre cada sinal simulado, são testados quatro perfis de perturbação distintos: ausência de ruído e três níveis de ruído aditivo gaussiano branco (AWGN) com relações sinal-ruído de 40 dB, 30 dB e 10 dB. Esse procedimento expande o banco de dados de 1344 para 5376 cenários de teste, permitindo a avaliação sistemática da sensibilidade dos estimadores à degradação do sinal.

- Algoritmos de estimação de parâmetros
  Os sinais são submetidos ao algoritmo de processamento central, que realiza: (i) a extração fasorial via janelamento com critério de estabilidade; (ii) a transformação para o domínio da frequência por meio da Transformada Numérica de Laplace (NLT); e (iii) a aplicação das formulações matriciais de Admitância Nodal e de Transmitância (parâmetros ABCD) para obtenção das estimativas de R, L, C e G por unidade de comprimento.

- R, L e C estimados por cenário
  O bloco consolida os 5376 conjuntos de parâmetros elétricos estimados, um para cada combinação de cenário simulado e nível de ruído, constituindo a base quantitativa para a análise comparativa de desempenho entre os métodos.

- Comparativo: esperado × estimado
  Os valores estimados são confrontados diretamente com os parâmetros inseridos na simulação, cujos valores são conhecidos. O erro relativo médio percentual é calculado para R, L, C e G, em função do nível de ruído e do método utilizado, permitindo quantificar a acurácia e a robustez numérica de cada formulação matricial.

- Modelo computacional monofásico calibrado
  É a camada de geração de métricas de erro da eficiência do algoritmo. O modelo sob análise, caso apresente baixa taxa de erros, é determinado como calibrado, representando o núcleo validado do método, pronto para aplicação sobre dados reais.

- Estimação de parâmetros
  Este bloco representa a etapa de aplicação prática do algoritmo calibrado: os mesmos procedimentos de extração fasorial e cálculo matricial são executados sobre os dados adquiridos em laboratório, sem conhecimento prévio dos parâmetros do cabo ensaiado, mantendo a abordagem de caixa-preta.

- Ensaio de degrau com cabos reais no laboratório
  Cabos reais de baixa tensão são submetidos a excitação de alta frequência por um gerador de função, com medição simultânea de tensão e corrente nos dois terminais por meio de osciloscópio de alta taxa de amostragem e transformador de corrente. As medições são realizadas sob duas configurações de circuito aberto (fontes nos lados opostos), alternadamente devido a limitações de medição, de modo a fornecer os dois conjuntos de dados.

- Medições em laboratório
  Os registros temporais de tensão e corrente obtidos nos ensaios são armazenados e transferidos ao algoritmo de estimação. Este bloco representa a interface entre o ambiente experimental e o processamento computacional.

- Comparativo: real × simulado
  Os parâmetros estimados a partir das medições reais são inseridos novamente na simulação no ATP/ATPDraw para comparação com um teste de resposta ao degrau.

4.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO PARA CALIBRAÇÃO DO ALGORITMO

Para obtenção das medições de tensão e corrente, foi necessário escolher um modelo de linha para ser adotado nas medições. Essa escolha tem de ser baseada no tipo de comportamento que se deseja avaliar a resposta do cabo. Conforme abordado no trabalho de [2], o uso de frequências elevadas foi uma das premissas para os ensaios nos cabos. Em [2] é realizada uma caracterização de cabos de baixa tensão com comprimento da ordem de 5 m utilizando uma forma de onda senoidal de 500 kHz, relacionando a seguir

com a resposta transitória esperada em simulação. Na experimentação foi apontado pelos autores a presença de acoplamento capacitivo entre os cabos. Para englobar de alguma forma este efeito, para o modelo de simulação, foi escolhida a topologia π de análise de linhas.

Com a escolha do modelo de linha a ser simulado, o próximo passo foi determinar qual ensaio a ser feito para obtenção das medições. Considerando a fundamentação do cálculo de admitância e o de transmitância, a diferença nos requisitos de medição entre os dois métodos reside na natureza algébrica do modelo de admitância versus a natureza física desacoplada do modelo de transmitância.

Para um cenário monofásico, a matriz de admitância nodal $\mathbf{Y}$ é uma matriz 2×2 contendo quatro incógnitas (admitâncias próprias e mútuas). Como uma única medição fornece apenas um vetor de tensão e um de corrente, o sistema resultante é indeterminado. O código soluciona isso concatenando duas medições distintas para formar matrizes quadradas $\mathbf{V}$ e $\mathbf{I}$, permitindo a operação de inversão matricial necessária para isolar matematicamente a matriz $\mathbf{Y}$.

Já a abordagem da matriz de transmitância fundamenta-se na teoria de quadripolos, onde os parâmetros longitudinais (impedância série) e transversais (admitância *shunt*) podem ser fisicamente isolados por condições de contorno extremas. A medição em curto-circuito é utilizada porque, ao anular a tensão de saída, a resposta do sistema é dominada pela impedância série, permitindo sua estimação robusta via mínimos quadrados; simultaneamente, a medição em circuito aberto anula a corrente de saída, fazendo com que a corrente de entrada dependa quase exclusivamente da admitância *shunt*.

Considerando esses fatores, foram montados três circuitos no mesmo ambiente de simulação, conforme pode ser visto nas Figuras 10, 11 e 12, para se tomar as medições necessárias de tensões e correntes e utilizar ambos os métodos de cálculo corretamente.

Figura 10 – Circuito aberto com a fonte do lado esquerdo.

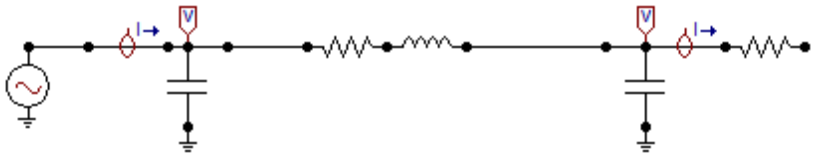


Figura 11 – Circuito aberto com a fonte do lado direito.

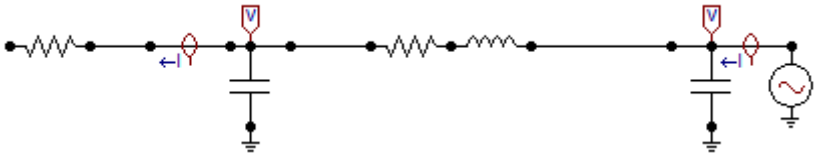
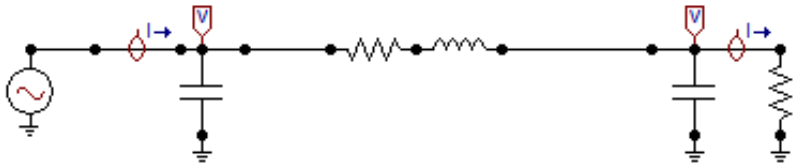


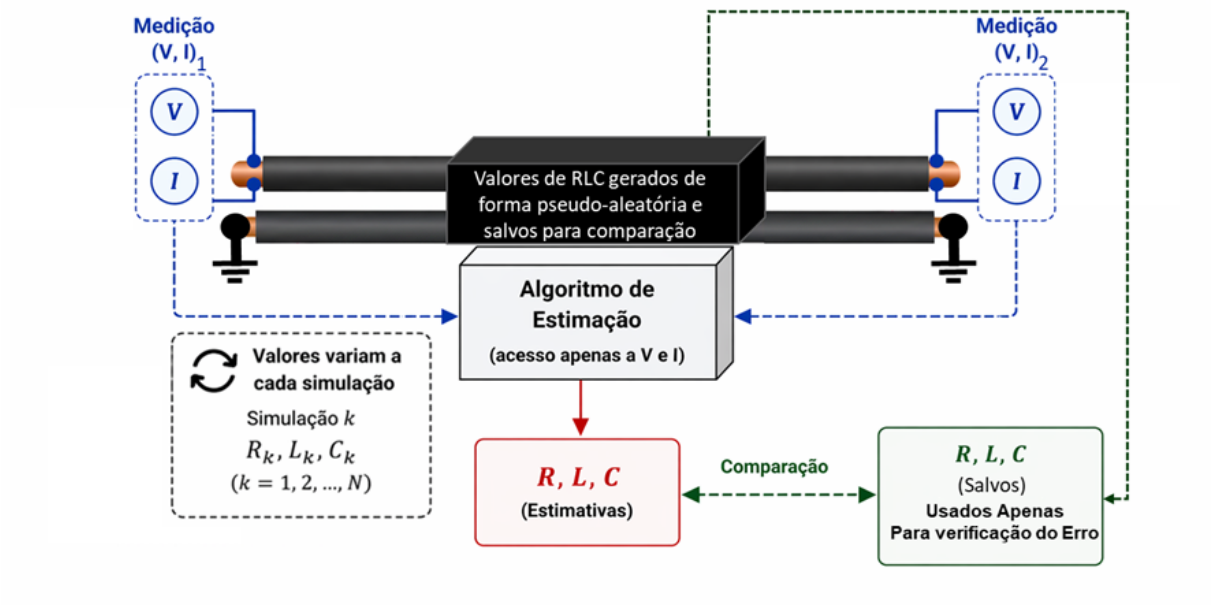
Figura 12 – Circuito para avaliação do curtocircuito com impedância de 1mΩ ligada ao terra.



O último fator a ser escolhido para definir o ambiente de simulação é a determinação das grandezas associadas as cada elemento. Considerando que R,L e C presentes no circuito serão as grandezas que irão representar o cabo em ensaio, a fonte com forma de onda senoidal deverá ter um valor de amplitude de tensão e uma frequência que um equipamento real também possa assumir.

O valor das grandezas associadas a cada elemento na simulação para os cenários de validação foi definido através de um algoritmo de geração pseudo-aleatória. A metodologia adotada partiu de uma distribuição uniforme contínua, garantindo que qualquer valor dentro do intervalo estipulado tivesse igual probabilidade de ocorrência. Desse modo, é possível manter a perspectiva de caixa-preta para o algoritmo de processamento, conforme pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Ilustração de como o algoritmo interage os valores de R,L e C gerados.



A Tabela 1 detalha os limites e a resolução numérica (casas decimais) configuradas para cada grandeza física.

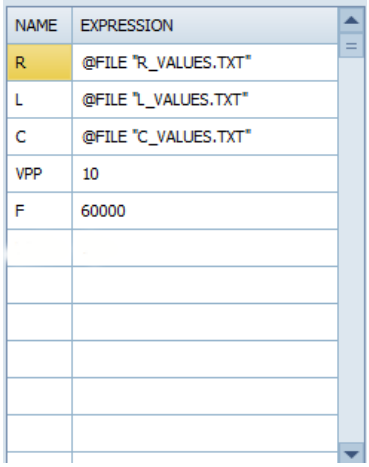
Tabela 1 – Parâmetros de Configuração da Geração Pseudo-Aleatória

Grandeza	**Amostras (N)**	**Limite Inferior**	**Limite Superior**
Resistência (R)	1344	1 mΩ	1,0 Ω
Indutância (L)	1344	100 nH	0,1 mH
Capacitância (C)	1344	1 nF	1,0 μF

Os valores de tensão e frequência foram escolhidos para serem compatíveis com equipamentos encontrados em laboratório, considerando a possível validação em casos reais. Normalmente geradores de função possuem baixa amplitude de sinal e limitam a tensão de saída, por isso foi escolhida a tensão de 10 Vpp de onda senoidal como padrão. A frequência escolhida foi de 60 kHz, considerando a disponibilidade de sensores de corrente, já que os encontrados no mercado que operam acima de 100 kHz possuem um custo elevado.

O último ponto de ajuste da simulação foi a configuração para que o ATP/ATPDraw rodasse as simulações em sequência. Para esta fase do trabalho foram estipuladas 1344 rodadas de simulações, com passo de simulação de 1 E-8 segundos, onde cada uma irá assumir sequencialmente um valor de R, L e C da geração pseudo-aleatória. A configuração de simulação em sequência no software pode ser vista na Figura 14 a seguir.

Figura 14 – Configurações de grandezas para simulação em série.



4.2 TRANSFORMAÇÃO PARA O DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA: A TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE

O primeiro estágio do algoritmo consiste no pré-processamento dos sinais de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ adquiridos nos terminais da linha. Diferentemente das abordagens clássicas que utilizam fasores em regime permanente (frequência fundamental), este trabalho adota a Transformada Numérica de Laplace(NLT) para capturar o comportamento do sistema em um amplo espectro de frequências. Esta escolha é suportada pelo trabalho de [41], que demonstra que a NLT permite a inclusão de um fator de amortecimento, essencial para mitigar erros de *aliasing* e truncamento em janelas de observação finitas.

Para uma função causal $f(t)$ amostrada em um intervalo de observação T, a imagem no domínio de Laplace $F(s)$ é obtida através da discretização da integral de Laplace:

$$F(s) = \int_0^T f(t)e^{-st}dt \approx \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t)e^{-c(n\Delta t)}e^{-j\omega(n\Delta t)}\Delta t, \tag{4.1}$$

onde $s = c + j\omega$ é a variável complexa de frequência. O parâmetro c atua como um fator de amortecimento real, calculado como $c = 2\ln(N)/T$ ou conforme sugerido em [1], $c = -\ln(\epsilon)/T$ para um erro de truncamento ϵ desejado. A aplicação deste algoritmo converte os vetores de medição temporal nos vetores complexos $\widehat{V}_S(s)$, $\widehat{V}_R(s)$, $\widehat{I}_S(s)$ e $\widehat{I}_R(s)$, correspondentes às tensões e correntes nos terminais emissor (S) e receptor (R), respectivamente.

4.3 ESTRUTURAÇÃO VIA MATRIZ DE ADMITÂNCIA NODAL

A primeira representação estrutural do algoritmo baseia-se na Matriz de Admitância Nodal ($\mathbf{Y}$), que relaciona as injeções de corrente nos nós com as tensões nodais. Esta abordagem é clássica na modelagem de sistemas de potência, mas sua reconstrução a partir de medições requer a resolução de um problema inverso.

Para uma linha de transmissão genérica, o modelo de dois pólos no domínio da frequência é descrito pela equação matricial:

$$\begin{bmatrix} I_S(s) \\ I_R(s) \end{bmatrix} = \mathbf{Y}(s) \begin{bmatrix} V_S(s) \\ V_R(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(s) & \mathbf{B}(s) \\ \mathbf{C}(s) & \mathbf{D}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S(s) \\ V_R(s). \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Neste contexto, o algoritmo não assume a simetria da linha a priori. As submatrizes $\mathbf{A}(s)$ e $\mathbf{D}(s)$ representam as admitâncias próprias dos nós, enquanto $\mathbf{B}(s)$ e $\mathbf{C}(s)$ representam as admitâncias de transferência. O problema de estimação torna-se a determinação dos elementos da matriz $\mathbf{Y}(s)$ para cada ponto de frequência de interesse.

O algoritmo estrutura este problema como um sistema linear da forma $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Uma inovação importante trazida de [41] é o tratamento de sistemas indeterminados através da concatenação de múltiplos eventos de medição. Se apenas um conjunto de registros (V, I) for utilizado, o sistema possui mais incógnitas do que equações, impossibilitando uma solução única para modelos não simétricos. O algoritmo, portanto, acumula k conjuntos de medições independentes (oriundos de diferentes eventos de manobra ou condições de carga), resultando em um sistema superdeterminado:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{I}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{V}^{(k)} \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{vec}. \tag{4.3}$$

A solução é obtida através do método dos Mínimos Quadrados de Norma Mínima (MNLS), que busca o vetor $\mathbf{Y}_{vec}$ que minimiza a norma L2 do erro residual $||\mathbf{V}\mathbf{Y}_{vec} - \mathbf{I}||_2$.

4.4 ESTRUTURAÇÃO VIA MATRIZ DE TRANSMITÂNCIA

Enquanto o modelo de admitância foca na relação nodal, a segunda estrutura implementada no algoritmo utiliza a Matriz de Transmitância ($\mathbf{T}$), também conhecida como parâmetros ABCD. Esta abordagem é empregada por [42], sendo citada como a de maior precisão especialmente para linhas curtas, onde a matriz de admitância pode apresentar sensibilidade numérica elevada devido à magnitude dos parâmetros *shunt* ser muito inferior à dos parâmetros longitudinais.

A relação fundamental no modelo de Transmitância conecta as grandezas do terminal emissor diretamente às do terminal receptor:

$$\begin{bmatrix} V_S(s) \\ I_S(s) \end{bmatrix} = \mathbf{T}(s) \begin{bmatrix} V_R(s) \\ -I_R(s) \end{bmatrix}. \tag{4.4}$$

A estrutura do algoritmo para a estimação da matriz $\mathbf{T}$ difere da admitância pois as variáveis independentes (excitadoras na formulação de regressão) tornam-se as grandezas do lado receptor. Os autores em [2] argumentam que, para linhas curtas, o produto da impedância longitudinal pela admitância *shunt* ($Z_l Y_l$) tende a zero, fazendo com que a matriz de transmitância se aproxime da matriz identidade.

O algoritmo implementado realiza a verificação cruzada entre os modelos. Para linhas curtas, a formulação via Transmitância é priorizada devido ao melhor condicionamento numérico. A matriz $\mathbf{T}$ é decomposta em seus elementos constitutivos para recuperar os parâmetros físicos da linha (impedância série Z e admitância shunt Y), utilizando a relação:

$$\mathbf{T} \approx \begin{bmatrix} \mathbf{I} + \frac{\mathbf{ZY}}{2} & -\mathbf{Z} \\ -\mathbf{Y} & \mathbf{I} + \frac{\mathbf{YZ}}{2} \end{bmatrix}. \tag{4.5}$$

Esta estruturação permite que o algoritmo isole a impedância longitudinal com maior robustez frente a ruídos de medição, uma vez que a sensibilidade da matriz $\mathbf{T}$ a erros aditivos nas correntes é menor comparada à matriz $\mathbf{Y}$ em cenários de baixa impedância [42].

4.5 ADAPTAÇÕES PARA CENÁRIOS MONOFÁSICOS E DIVERGÊNCIAS DA LITERATURA

A literatura de referência constrói a fundamentação teórica baseada majoritariamente em sistemas trifásicos acoplados. Nesses casos, as variáveis V e I são vetores 3×1

e as matrizes de parâmetros são 3×3. Contudo, a implementação desenvolvida neste trabalho foca e adapta essas estruturas inicialmente apenas para o cenário monofásico. Esta adaptação implica em alterações estruturais profundas na dimensionalidade do problema e na interpretação física dos acoplamentos.

4.5.1 Redução de Dimensionalidade e Perda de Informação de Acoplamento

No algoritmo proposto, as equações matriciais apresentadas anteriormente sofrem uma redução de ordem. As matrizes $\mathbf{Y}(s)$ e $\mathbf{T}(s)$, anteriormente blocos de submatrizes 3×3, tornam-se escalares complexos dependentes da frequência para o caso de uma linha monofásica simples, ou matrizes 2×2 no contexto de um quadripólo geral (considerando entrada e saída). Isso simplifica o sistema linear:

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix}. \tag{4.6}$$

Esta simplificação reduz drasticamente o custo computacional e a necessidade de memória, eliminando a necessidade de decomposição modal discutida em [41] para linhas transpostas.

4.6 AVALIAÇÃO DE ERROS E MODELAGEM DE RUÍDO GAUSSIANO

A validação da robustez do algoritmo é realizada através da injeção controlada de ruído nos sinais simulados. A modelagem de erro segue a distribuição Gaussiana (ruído aditivo gaussiano branco).

4.6.1 Modelo Estatístico do Ruído

Define-se o sinal medido $\tilde{x}(t)$ como a soma do sinal verdadeiro $x(t)$ e de um componente de erro $\eta(t)$:

$$\tilde{x}(t) = x(t) + \eta(t), \quad \eta(t) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2). \tag{4.7}$$

Diferente da abordagem simplista de apenas adicionar um percentual de erro, o algoritmo calcula a variância do ruído σ^2 baseada na Relação Sinal-Ruído (SNR) desejada. A amplitude do ruído é escalonada dinamicamente em relação à potência do sinal útil, garantindo consistência nos testes.

O algoritmo implementa o método dos Mínimos Quadrados Ponderados (WLS - *Weighted Least Squares*) para mitigar o efeito deste ruído. A matriz de covariância do ruído $\mathbf{Q}$, sugerida em [42], é incorporada na solução do sistema linear:

$$\boldsymbol{\theta}_{WLS} = (\mathbf{H}^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{z}, \tag{4.8}$$

onde $\mathbf{H}$ é a matriz de observação construída a partir das tensões (ou correntes, dependendo do modelo), $\mathbf{z}$ é o vetor de medições dependentes, e $\mathbf{Q}$ é uma matriz diagonal contendo as variâncias inversas do ruído estimado para cada amostra.

4.6.2 Níveis de Ruído

O modelo estatístico e os níveis de erro foram definidos na simulação do algoritmo, utilizando os cenários:

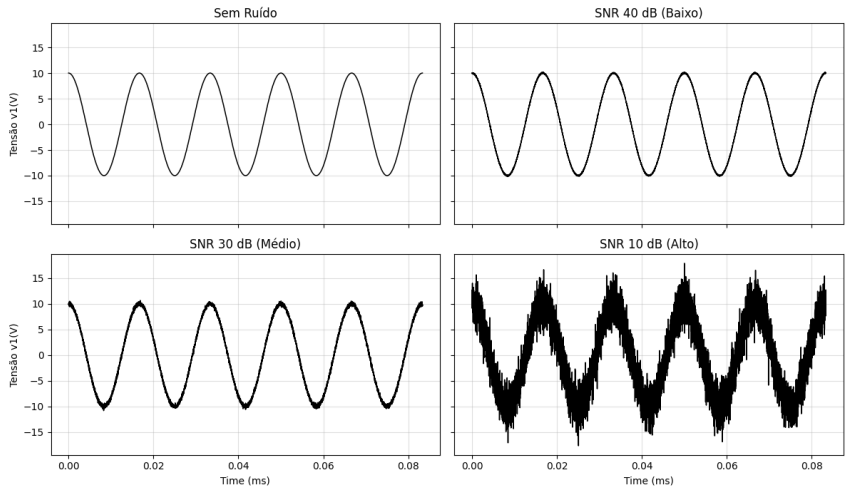
1. **Cenário Baixo (SNR 40 dB):** A amplitude esperada do ruído é de aproximadamente 1% da amplitude do sinal (fator $\approx 0,01$). Neste cenário, a taxa de erro de estimação esperada deve ser mínima, servindo como referência para a estabilidade e convergência do algoritmo.

2. **Cenário Médio (SNR 30 dB):** A amplitude esperada do ruído é de aproximadamente $3,16\%$ da amplitude do sinal (fator $\approx 0,0316$). A injeção de ruído desta magnitude é o primeiro desafio significativo para a extração do fasor e para a estabilização do cálculo.

3. **Cenário Alto (SNR 10 dB):** A amplitude esperada do ruído atinge aproximadamente $31,6\%$ da amplitude do sinal (fator $\approx 0,316$). Este é o cenário de teste de estresse, simulando condições extremamente adversas, como medições próximas a descargas ou falhas graves de comunicação/instrumentação.

É possível observar na Figura 15 a seguir o impacto de cada nível de ruído em uma medição de tensão utilizada:

Figura 15 – Sinais de tensão com os níveis de ruídos: sem e com 40, 30 e 10 dB.



4.6.3 Estratégia de Convergência (Janelamento Adaptativo)

A presença do ruído forçou a implementação de um algoritmo de janelamento adaptativo no cálculo do fasor(substituindo o método de janela fixa). Este é um ponto de divergência metodológica crucial quando comparado com os trabalhos de [41] e [42]:

- **Com Ruído (40 dB, 30 dB, 10 dB):** O fasor é extraído incrementalmente, e a extração só é considerada estável quando a amplitude do fasor em ciclos consecutivos se mantém dentro da faixa de variação de ±0,5%.
- **Sem Ruído:** O fasor é extraído da porção final mais estável do sinal (50% final).

Esta adaptação é vital para garantir que a estimativa do fasor represente o regime permanente e não o ruído aleatório ou os picos iniciais do transitório, aumentando significativamente a robustez do algoritmo em cenários ruidosos.

4.7 ESTABILIZAÇÃO DO FASOR E SELEÇÃO DO PONTO DE CÁLCULO

A exatidão da reconstrução do modelo no domínio da frequência é intrinsecamente dependente da correta extração do fasor (amplitude e ângulo) de cada grandeza ($\widehat{V}_S, \widehat{V}_R, \widehat{I}_S, \widehat{I}_R$). Quando o ruído é introduzido, o transiente inicial e as flutuações estocásticas do AWGN comprometem a identificação do estado de regime permanente. Para resolver este problema, o algoritmo implementa um método de janelamento associado a um critério de estabilidade.

4.7.1 Princípio do Janelamento Adaptativo

Para os cenários com ruído (40 dB, 30 dB, 10 dB), o algoritmo abandona o uso de uma janela de tempo fixa e adota uma abordagem incremental. O fasor $\mathbf{F}$ é calculado sucessivamente sobre janelas de tempo de duração crescente, sendo que o aumento é sempre um número inteiro de ciclos da frequência nominal, minimizando o vazamento espectral.

Seja T_{ciclo} o tempo de um ciclo e N_{ciclos} o número de ciclos de análise. A janela de tempo T_n para a iteração n é:

$$T_n = n \times T_{\text{ciclo}}. \tag{4.9}$$

O processo inicia-se após $n = 5$ ciclos e avança em incrementos de 2 ciclos, até atingir o limite máximo de $N_{\max}$ ciclos (definido como 100 no algoritmo). Para cada janela T_n, é aplicada a função de janelamento de Hanning para mitigar os efeitos de truncamento, e a Transformada Rápida de Fourier (FFT) é utilizada para extrair o fasor $\mathbf{F}_n$:

$$\mathbf{F}_n = \mathrm{FFT}\left(w_{\mathrm{Hanning}}(t) \cdot x(t)\right)\Big|_{\omega=\omega_{\mathrm{alvo}}}. \tag{4.10}$$

A escolha da janela de Hanning justifica-se pelo comportamento espectral do sinal processado. A operação de truncamento temporal, inerente à análise de qualquer sinal de duração finita, corresponde no domínio da frequência à convolução do espectro do sinal com a transformada da função retangular, cujos lóbulos laterais de alta amplitude introduzem vazamento espectral (*spectral leakage*) que contamina a estimativa do componente fundamental com energia proveniente de componentes adjacentes. A janela de Hanning suprime esse efeito ao atenuar suavemente o sinal nas extremidades do segmento, reduzindo a amplitude dos lóbulos laterais em aproximadamente 31 dB em relação à janela retangular [40]. Essa característica é particularmente relevante no contexto deste trabalho, pois os sinais simulados contêm componentes de ruído branco gaussiano em toda a banda, e qualquer energia fora da frequência fundamental de 60 kHz de interesse degrada diretamente a estimativa do fasor.

Do ponto de vista da implementação, a estimação fasorial não é realizada amostra a amostra, como seria o caso de um estimador recursivo do tipo DFT deslizante ou filtro de Kalman, mas sim por processamento em bloco. A cada iteração n, o segmento completo $x\left[0 \ldots n \cdot N_{\mathrm{ciclo}} - 1\right]$ é multiplicado pela janela de Hanning de comprimento correspondente e submetido à FFT completa, conforme implementado na função `fasor_janelado`. O fasor na frequência-alvo f_0 é obtido pelo coeficiente de Fourier mais próximo de f_0 no vetor de frequências discretas, corrigido por um fator de normalização $4/N$, que compensa simultaneamente dois efeitos: (i) a normalização da FFT discreta, que divide a energia pelo número de amostras N; e (ii) o ganho de amplitude da janela de Hanning, cujo valor coerente é 0,5, exigindo multiplicação por 2 para recuperar a amplitude real do sinal. A combinação desses dois fatores resulta no coeficiente $2/N$ para um espectro bilateral, ou $4/N$ quando se considera apenas o coeficiente do espectro de frequências positivas, que é o caso implementado. Esse fator de normalização é condição necessária para que os fasores $\widehat{V}_S$, $\widehat{V}_R$, $\widehat{I}_S$ e $\widehat{I}_R$ preservem as relações de amplitude e fase corretas antes de serem inseridos nas formulações matriciais de Admitância e Transmitância.

O fasor $\mathbf{F}_n$ é armazenado em um histórico, servindo como a série de convergência do sinal, sobre a qual o critério de estabilidade descrito na seção seguinte é aplicado.

4.7.1.1 Seleção do Fasor Final

Uma vez que o critério de convergência é satisfeito, o fasor final ($\mathbf{F}_{\mathrm{final}}$) é estabelecido como a média dos três últimos valores estáveis calculados:

$$\mathbf{F}_{\mathrm{final}} = \frac{1}{3} \sum_{k=n-2}^{n} \mathbf{F}_k. \tag{4.11}$$

A lógica completa do algoritmo de janelamento adaptativo é realizada da seguinte forma: o processo tem início com uma janela mínima de $n = 5$ ciclos, avançando em incrementos de 2 ciclos a cada iteração. A cada passo, o fasor $\mathbf{F}_n$ é calculado pela FFT aplicada ao sinal janelado com a função de Hanning e armazenado em um buffer deslizante dos cinco valores mais recentes. O critério de estabilidade é verificado apenas a partir da quinta iteração, condição necessária para que o buffer esteja completamente preenchido. A variação relativa é definida como a razão entre a amplitude de variação (diferença entre o máximo e o mínimo do buffer) e a média dos cinco fasores. Quando essa grandeza cai abaixo do limiar $\varepsilon = 0{,}5\%$, a convergência é declarada e o fasor final é calculado pela média dos três últimos valores estáveis, conforme a Equação 4.11. O uso da média de três pontos, em vez do último valor isolado, atenua flutuações residuais do ruído na vizinhança do ponto de convergência, fornecendo um estimador de regime permanente mais robusto para a etapa subsequente de cálculo das matrizes $\mathbf{Y}$ ou $\mathbf{T}$.

Caso o limite de 100 ciclos seja atingido sem que o critério de estabilidade seja satisfeito, situação que ocorre em cenários de ruído severo (SNR $\leq$ 10 dB), o algoritmo aciona o mecanismo de *fallback*: o fasor final é obtido pela média dos cinco últimos valores calculados, independentemente de terem atingido estabilidade. Essa estratégia de contingência garante que o algoritmo sempre retorne uma estimativa de fasor. Do ponto de vista prático, o *fallback* atua como um limitador de custo computacional: ao impor um teto de 100 ciclos de análise, evita-se progressão indefinida do algoritmo.

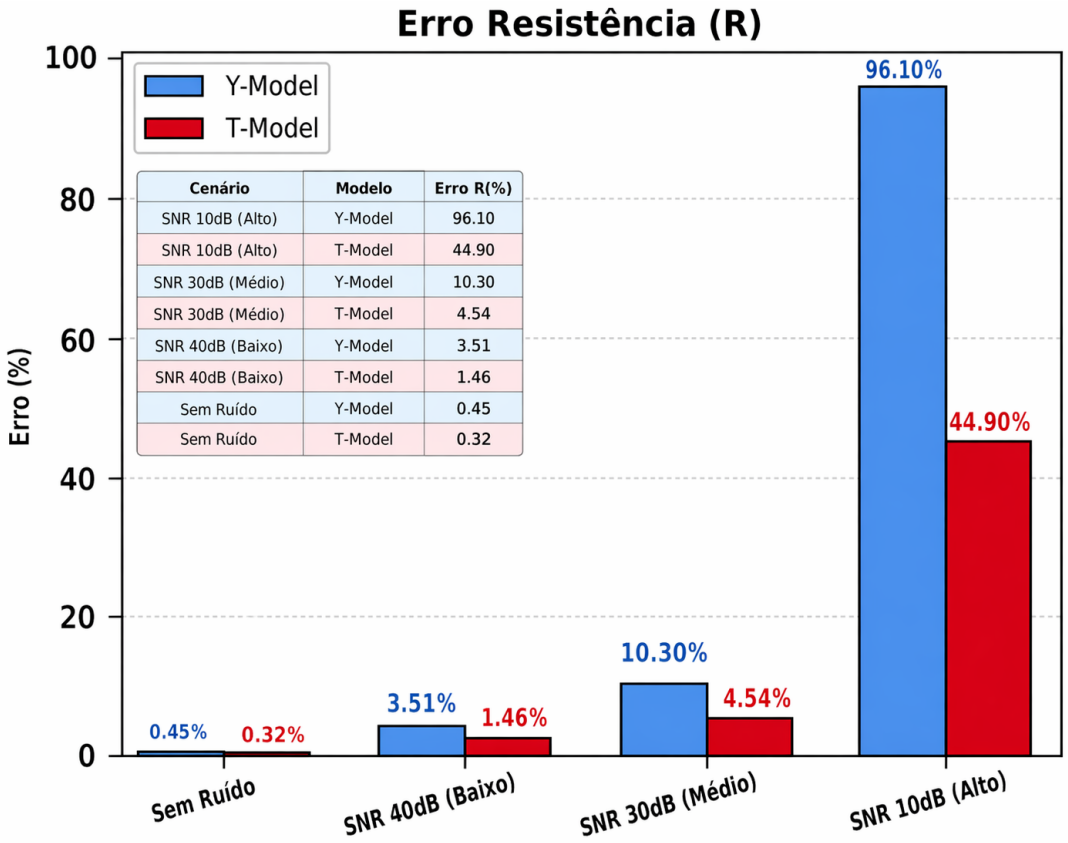
5 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM SIMULAÇÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados da aplicação dos métodos de cálculo de admitância e transmitância na estimativa dos parâmetros R,L, C e G. O foco principal da análise recai sobre a robustez de cada método de cálculo quando submetido a diferentes níveis de degradação do sinal, variando de um cenário ideal (sem ruído) até condições mais severas com Relação Sinal-Ruído (SNR) de 10dB.

5.1 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA

A Figura 16 apresenta a evolução do erro médio percentual na estimação da resistência série R para os dois métodos avaliados conforme o nível de ruído aumenta. Observa-se uma progressão de erro coerente com o comportamento esperado do algoritmo: em condições ideais, ambos os métodos praticamente não apresentam discrepâncias, evidenciando que a extração fasorial e as formulações matemáticas operam de forma estável na ausência de perturbações. À medida que o ruído é introduzido, o erro cresce de forma gradual, inicialmente de maneira suave, refletindo a eficiência do mecanismo de estabilização progressiva baseado em janelas crescentes.

Figura 16 – Detalhamento da evolução do erro na Resistência em função do ruído.



Cenário	Modelo	Erro R(%)
SNR 10dB (Alto)	Y-Model	96.10
SNR 10dB (Alto)	T-Model	44.90
SNR 30dB (Médio)	Y-Model	10.30
SNR 30dB (Médio)	T-Model	4.54
SNR 40dB (Baixo)	Y-Model	3.51
SNR 40dB (Baixo)	T-Model	1.46
Sem Ruído	Y-Model	0.45
Sem Ruído	T-Model	0.32

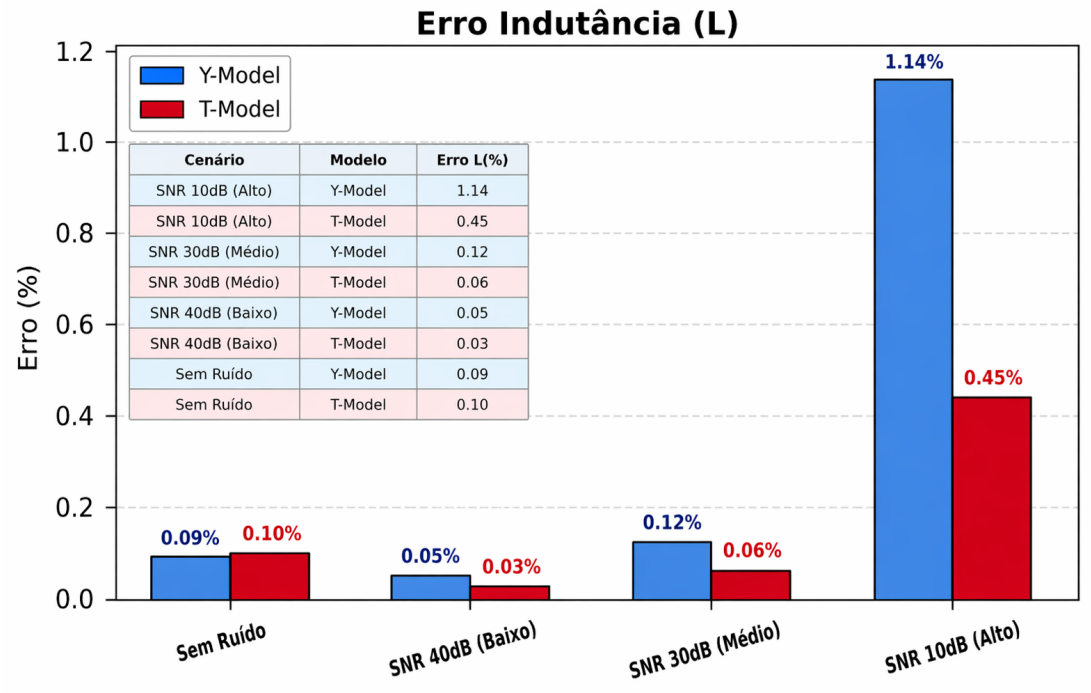
Conforme o ruído presente no sinal aumenta, o cálculo da admitância passa a

ter maior sensibilidade, uma vez que depende de uma inversão matricial, o que o deixa matematicamente mais suscetível a pequenas flutuações fasoriais e consequentemente a erros de cálculo. A transmitância, por sua vez, mantém erros menores ao longo de toda a faixa de ruído, sustentado por uma formulação menos dependente de operações numericamente instáveis e mais resiliente a deformações de fase e amplitude. No limite de ruído severo (SNR de 10 dB), essa diferença torna-se marcante: o erro da admitância cresce de forma abrupta, enquanto o método de cálculo que utiliza a transmitância, embora também impactado, conserva uma taxa de erro menor.

5.2 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA INDUTÂNCIA

A estimativa de indutância (L) apresentou melhor precisão mesmo em cenários ruidosos. A Figura 17 mostra que os erros se mantiveram abaixo de 1,2% mesmo no pior cenário. O modelo T demonstrou uma ligeira vantagem sobre o Modelo Y, mantendo o erro abaixo de 0,50% no pior cenário de ruído.

Figura 17 – Detalhamento da evolução do erro na indutância em função do ruído.



Cenário	Modelo	Erro L(%)
SNR 10dB (Alto)	Y-Model	1.14
SNR 10dB (Alto)	T-Model	0.45
SNR 30dB (Médio)	Y-Model	0.12
SNR 30dB (Médio)	T-Model	0.06
SNR 40dB (Baixo)	Y-Model	0.05
SNR 40dB (Baixo)	T-Model	0.03
Sem Ruído	Y-Model	0.09
Sem Ruído	T-Model	0.10

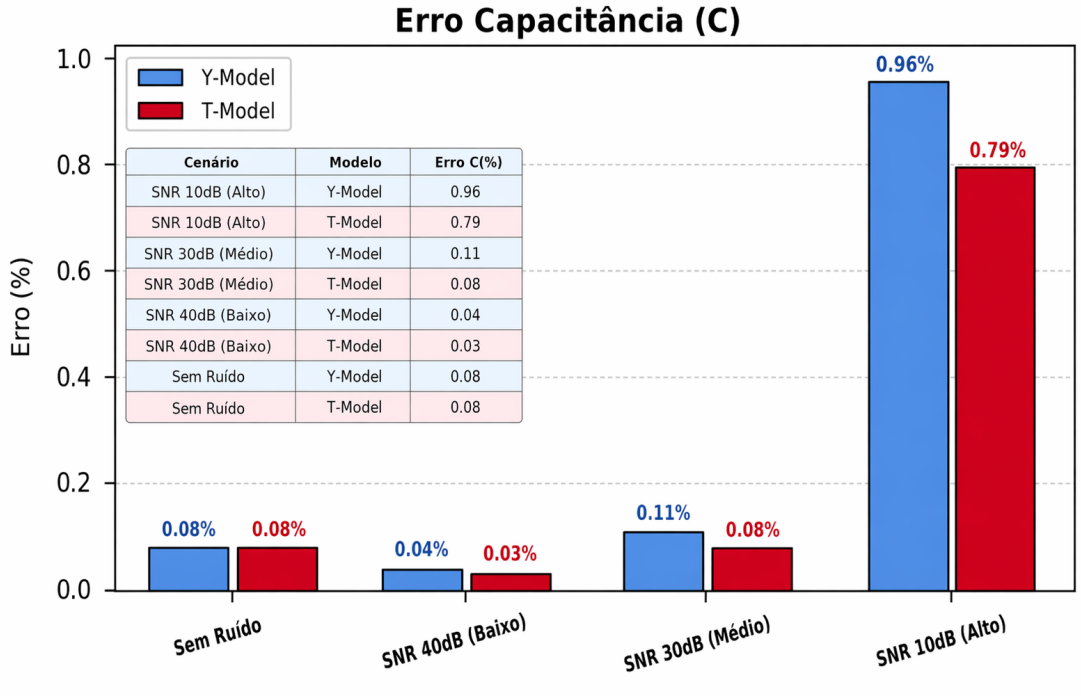
5.3 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DA CAPACITÂNCIA

A análise da precisão da estimativa da capacitância (C), apresentada na Figura 18, mostra que a capacitância foi determinada com boa precisão mesmo no cenário de maior ruído.

O Modelo T obteve um desempenho quase ideal, com erros na ordem de 0,8%, demonstrando ser eficaz em isolar a admitância transversal através das medições combina-

das de curto e aberto. O Modelo Y apresentou um erro sistemático ligeiramente maior, próximo de 1%.

Figura 18 – Detalhamento da evolução do erro na capacitância em função do ruído.



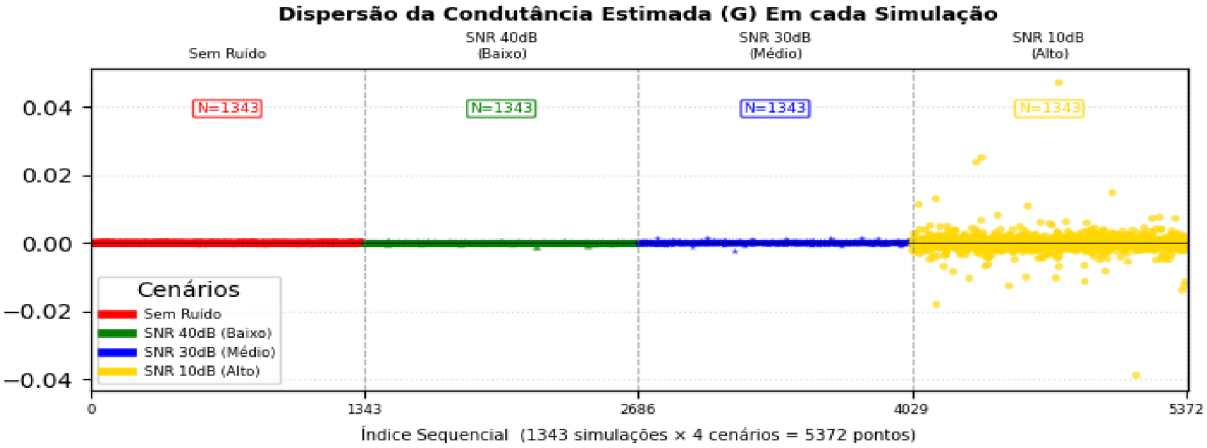
Cenário	Modelo	Erro C(%)
SNR 10dB (Alto)	Y-Model	0.96
SNR 10dB (Alto)	T-Model	0.79
SNR 30dB (Médio)	Y-Model	0.11
SNR 30dB (Médio)	T-Model	0.08
SNR 40dB (Baixo)	Y-Model	0.04
SNR 40dB (Baixo)	T-Model	0.03
Sem Ruído	Y-Model	0.08
Sem Ruído	T-Model	0.08

5.4 ANÁLISE DA CONDUTÂNCIA

A Figura 19 apresenta a dispersão dos valores de condutância (G) estimados pelos modelos de admitância e de transmitância ao longo dos 1344 cenários simulados, sob os quatro níveis de degradação do sinal avaliados. A condutância é apresentada em termos de dispersão absoluta dos valores estimados (S/m).

Observa-se que, nos cenários sem ruído e com SNR de 40 dB e 30 dB, ambos os modelos convergem para estimativas de G próximas de zero, com dispersão reduzida. À medida que o nível de ruído aumenta para SNR de 10 dB, a dispersão cresce de forma expressiva, com a ocorrência de valores espúrios de maior magnitude, tanto positivos quanto negativos.

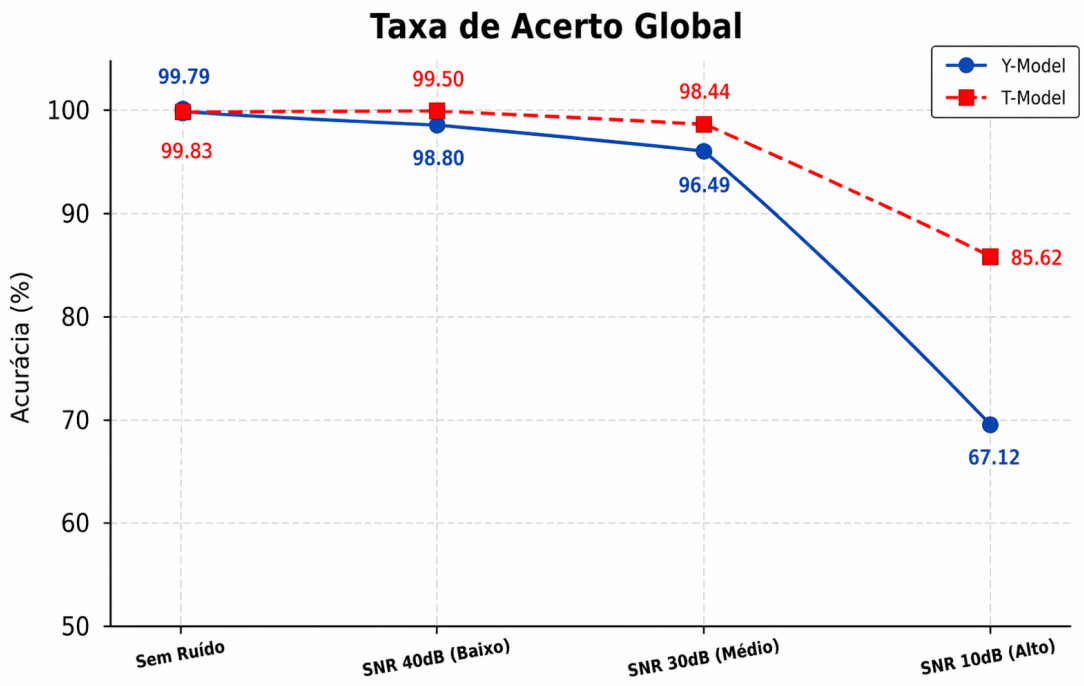
Figura 19 – Detalhamento do cálculo da condutância nos diferentes níveis de ruído.



5.5 ANÁLISE DO DESEMPENHO GERAL DA ESTIMAÇÃO

A Figura 20 consolida a taxa de acerto global dos algoritmos. Embora o método da matriz de Admitância empregado baseado em [41], seja computacionalmente eficiente e preciso, o método da Transmitância empregado, baseado em [42] e utilizada na análise manteve maior precisão em todos os cenários de ruído.

Figura 20 – Panorama global de desempenho e robustez entre os métodos avaliados.



Os resultados evidenciam que, embora ambos os métodos apresentem desempenho consistente em condições ideais ou com baixo nível de ruído, a resistência é o parâmetro que mais se degrada conforme a SNR diminui. Essa estimativa de R depende diretamente do componente real das impedâncias, cuja magnitude é pequena e altamente sensível

a distorções fasoriais, fazendo com que as variações mínimas introduzidas pelo ruído sejam significativamente amplificadas no cálculo. O aumento do erro em R, sobretudo na admitância, não caracteriza uma falha no algoritmo, mas sim uma limitação numérica do problema devido à ordem de grandeza das medições associadas no método de cálculo.

5.6 TESTE COM MEDIÇÕES REAIS

Após a validação numérica em ambiente simulado, o próximo passo foi submeter o modelo a testes com dados reais adquiridos em bancada. O setup experimental consistiu na medição de sinais de tensão e corrente, utilizando o gerador de função Keysight/33509B-903 e o osciloscópio Rigol MSO8000(2 GHz de largura de banda e 10 GSa/s de taxa de amostragem), em um cabo de 6 mm² sob duas condições operacionais distintas, em dois momentos diferentes, devido à disponibilidade de apenas um transformador de corrente de alta frequência. Logo, cada medição designada como Medição 1 (M1) e Medição 2 (M2), conforme ilustrado nas Figuras 21 e 22, é um conjunto de duas medições em instantes de tempo diferentes, sincronizadas digitalmente.

Figura 21 – Configuração da bancada de instrumentação para a Medição 1 (M1).

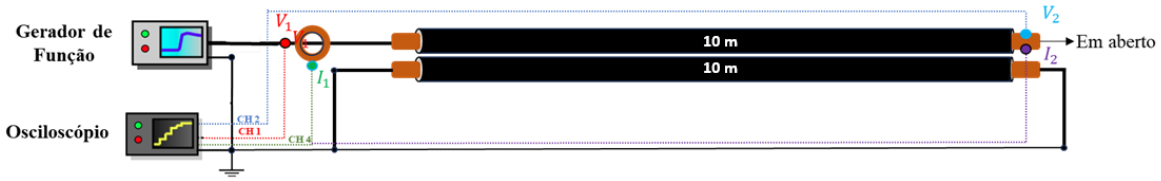


Figura 22 – Configuração da bancada de instrumentação para a Medição 2 (M2).



É importante ressaltar uma limitação operacional nos ensaios práticos: ao contrário das simulações computacionais, a realização de um teste de curto-circuito pleno foi inviável devido aos riscos de danos aos equipamentos. Diante disso, o conjunto de dados experimentais restringiu-se às medições em circuito aberto, impossibilitando a aplicação direta do método da matriz de Transmitância, que exige medições em condições de curto-circuito para isolar a impedância série com precisão máxima. A validação concentrou-se, portanto, na robustez do método da Matriz de Admitância sob condições reais de ruído e instrumentação.

Realizando as medições de tensão e corrente conforme mostrado nas Figuras 21 e 22, foram obtidas as curvas separadamente em formato *.csv*. Utilizando esses dados o próximo passo foi utilizar o modelo computacional calibrado para realizar a estimativa de parâmetros distribuídos do cabo ensaiado. As grandezas obtidas após o processamento dos dados das medições no modelo computacional são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros calculados a partir das medições de bancada para o cabo de 6mm².

Parâmetro	**Valor**
Resistência (Ω/m)	59,57 mΩ
Indutância (H/m)	16,09 nH
Capacitância (F/m)	1,43 nF

5.7 COMPARATIVO DO MODELO COMPUTACIONAL

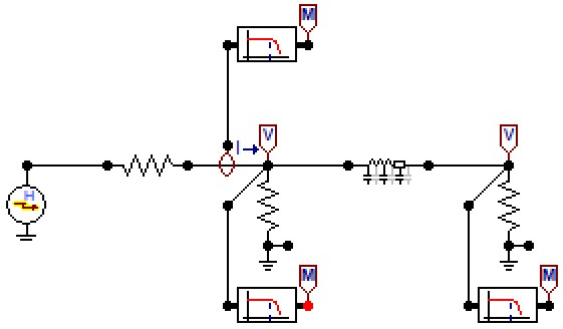
Com os parâmetros distribuídos do cabo de 6 mm² estimados pelo método da Matriz de Admitância, conforme apresentado na Tabela 2, a etapa subsequente consiste em verificar se esses valores são fisicamente representativos ao cabo ensaiado; ou seja, se um modelo de simulação parametrizado com os valores estimados é capaz de reproduzir fielmente uma resposta eletromagnética independente daquela utilizada na própria estimação. Para tanto, realizou-se um ensaio de degrau em bancada, cuja configuração é ilustrada na Figura 23. Nesse ensaio, um degrau de tensão de 10 V_{pp} é aplicado à extremidade de envio do cabo por meio de um gerador de sinais, com uma resistência série de 1 kΩ interposta entre a fonte e o condutor. A resposta transitória de tensão é registrada pelo osciloscópio no nó de conexão entre o resistor e o cabo, capturando a forma de onda característica que reflete os efeitos combinados de R, L e C do condutor. Esse procedimento constitui uma validação cruzada independente: os parâmetros foram estimados a partir de medições em regime senoidal de alta frequência e são agora confrontados com a resposta a um estímulo transiente de banda larga, condição operacional fisicamente distinta da utilizada na calibração do algoritmo.

Figura 23 – Configuração de medição para ensaio de degrau.



Como referência de topologia para o modelo simulado, adotou-se a estrutura proposta por [2], ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Modelo de cabo para estudos transitórios de baixa tensão.



Fonte: Obtido de [2].

Para investigar o efeito do nível de discretização sobre a fidelidade da resposta simulada, o número de seções foi variado sistematicamente em duas topologias distintas disponíveis no ATP/ATPDraw: o modelo π de parâmetros concentrados e o modelo de parâmetros distribuídos no domínio do tempo. Em ambos os casos, foram utilizados os mesmos valores estimados de $R = 59{,}57$ mΩ/m, $L = 16{,}09$ nH/m e $C = 1{,}43$ nF/m, com comprimento de seção de 5 m, conforme registrado nas janelas de configuração do ATP/ATPDraw reproduzidas nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Parâmetros estimados do cabo real inseridos no modelo de simulação distribuído.

LINE: LINEZT_1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm/m	0.05957
L'	mH/m	1.609E-5
C'	µF/m	0.00143

Figura 26 – Parâmetros estimados do cabo real inseridos no modelo de simulação em topologia π.

LINE: LINEPI_1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm/m	0.05957
L	mH/m	1.609E-5
C	µF/m	0.00143

Partindo desses parâmetros, foram simuladas configurações com 1, 2, 3, 4, 6, 10 e 100 seções, tanto para o modelo π quanto para o distribuído, mantendo o comprimento total de 10 m em todos os casos. As curvas de tensão transitória resultantes são comparadas com a medição real nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Comparativo de curvas aumentando o número de seções de cabos em modelo π.

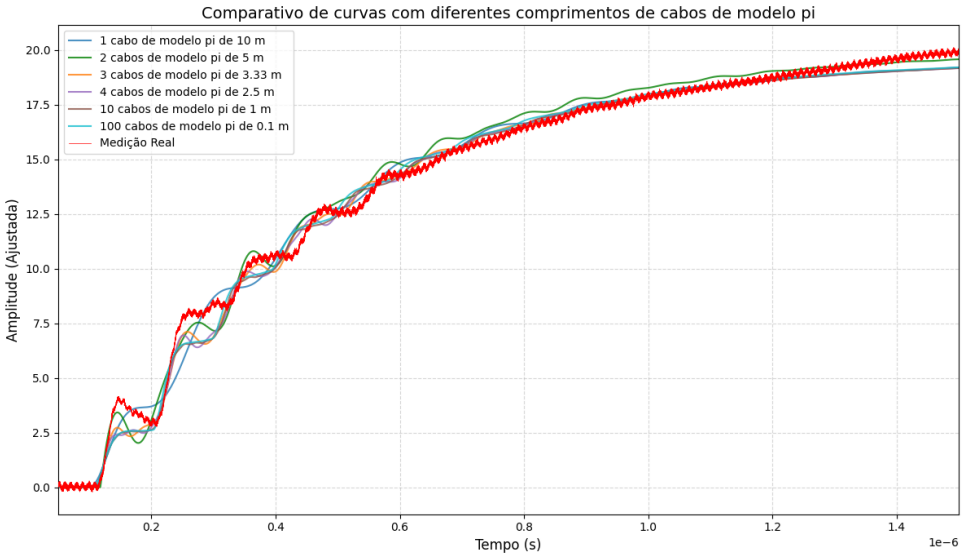
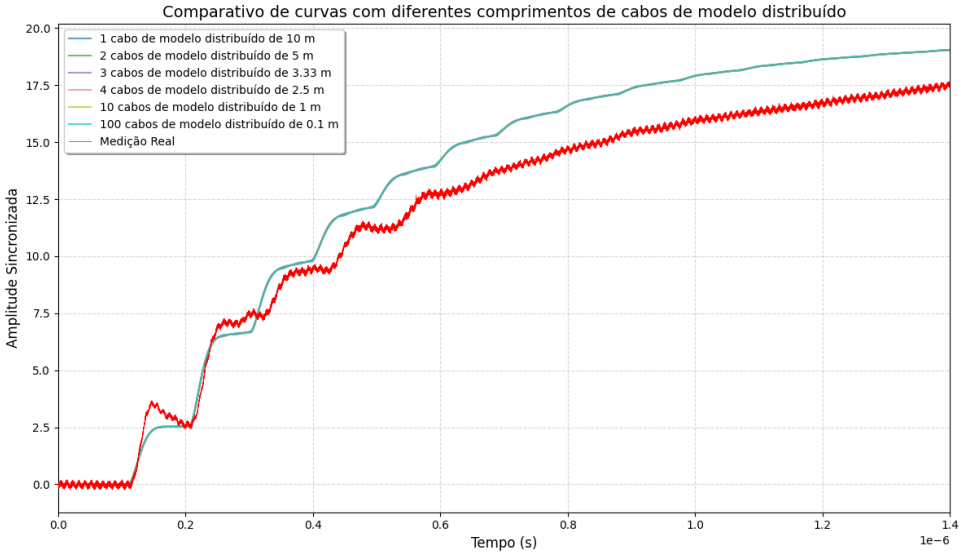


Figura 28 – Comparativo de curvas aumentando o número de seções de cabos em modelo distribuído.

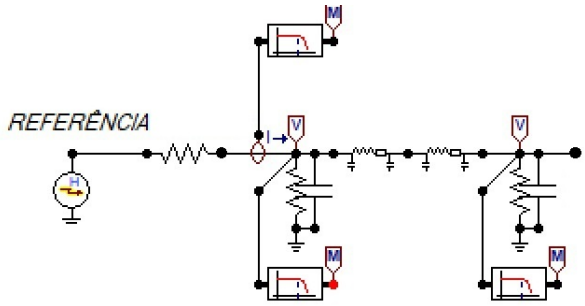


Na Figura 28, observa-se que o aumento do número de seções não produz melhoria na similaridade com a medição experimental, conforme esperado por ser um modelo distribuído. O ponto de interesse surgiu no comportamento que pode ser visto na Figura 27, à medida que mais modelos π eram colocados em cascata. Para o modelo π, a configuração de duas seções de 5 m cada, apresentou melhor correspondência entre fidelidade da frente de onda

transitória e estabilidade numérica da simulação. Configurações com maior número de segmentos do tipo π introduziram oscilações espúrias de origem numérica na resposta, até quase convergir para a resposta do modelo distribuído.

Identificada a topologia com resultados mais próximos da medição real, o modelo foi alterado para incluir os efeitos elétricos da probe de tensão do osciloscópio, cuja impedância de entrada é de 10 MΩ em paralelo com 13 pF. Esse elemento parasita, embora de alta impedância resistiva, impõe uma admitância capacitiva não desprezível na faixa de frequências relevante para a resposta ao degrau, afetando a constante de tempo observada e a amplitude em regime permanente registrada pelo instrumento. A Figura 29 apresenta o modelo final no ATP/ATPDraw, adaptado de [2], com a inclusão explícita da impedância de entrada da probe no nó de medição.

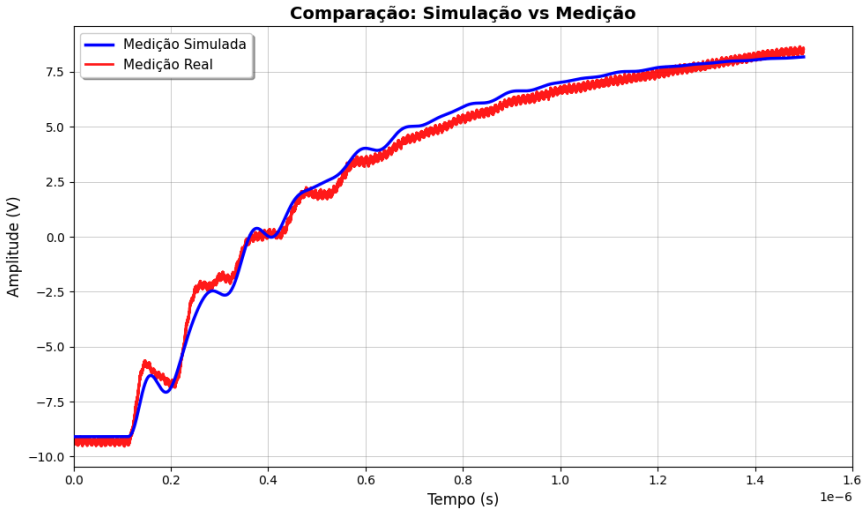
Figura 29 – Modelo de cabo de baixa tensão para estudos transitórios de [2].



Fonte: Adaptado de [2].

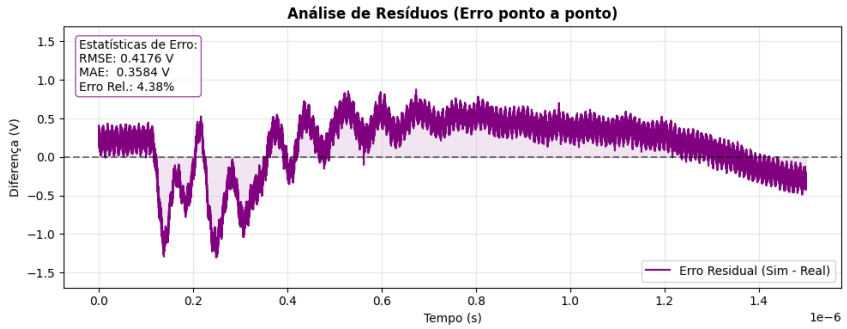
A Figura 30 apresenta a sobreposição entre a curva de tensão medida no ensaio de degrau e a curva obtida no modelo simulado com os parâmetros estimados e a probe modelada. A concordância entre as duas curvas, tanto na evolução temporal da frente de onda quanto no valor em regime permanente, evidencia que o algoritmo de estimação foi capaz de fornecer parâmetros representativos do comportamento real do cabo.

Figura 30 – Comparativo da curva real e da curva simulada obtida no ensaio de degrau.



A análise quantitativa do resíduo ponto a ponto, apresentada na Figura 31, indica erro quadrático médio(RMSE) = 0,4176 V, erro absoluto médio(MAE) = 0,3584 V e erro relativo de 4,38%. Discrepâncias mais acentuadas na região inicial, onde há os transitórios primários, podem ser atribuídas às limitações metrológicas, como a interferência das pontas de prova. Além disso a caracterização em 60 kHz realizada exclui a informação das demais frequências que compõem o sinal de onda quadrada, o que também inclui um erro de representatividade.

Figura 31 – Progressão de erro da curva real e simulada.



Os resultados apresentados ao longo deste capítulo, tomados em conjunto, demonstram a possibilidade de uso da metodologia proposta: parâmetros distribuídos de cabos de baixa tensão de curta extensão podem ser estimados a partir de medições fasoriais em alta frequência com precisão suficiente para reproduzir, em simulação, o comportamento característico real do condutor. Embora a frente de onda inicial não tenha sido reproduzida com exatidão total, o conjunto dos resultados abre frentes de investigação com o uso de dados mais similares aos reais para aplicações práticas em sistemas de distribuição. A comparação sistemática entre topologias π e distribuída com diferentes níveis de discretização, conduzida neste trabalho, fornece evidência empírica de que duas seções de 5 m são suficientes para representar cabos de 10 m na faixa de frequências investigada, contribuindo para orientar escolhas de modelagem em ferramentas como o ATP/ATPDraw em estudos posteriores. Por fim, os resultados validam a abordagem de caixa-preta baseada em formulações matriciais, calibrada em ambiente de simulação controlada e aplicada sobre dados experimentais, que foi capaz de produzir modelos de cabo representativos a partir das limitações de instrumentação de laboratório convencionais.

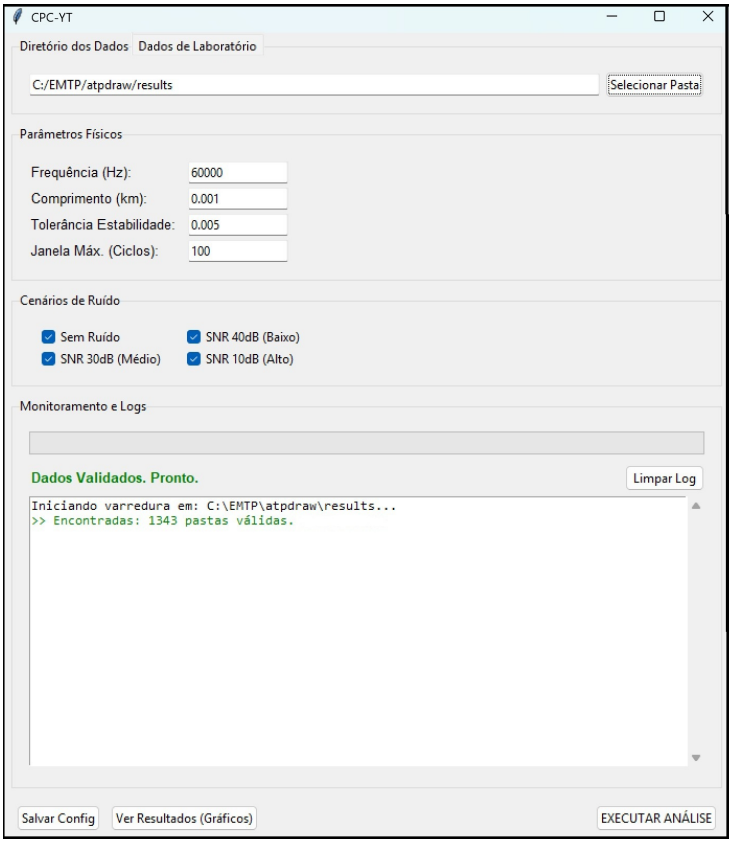
5.8 FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA

Com o objetivo de facilitar a reprodução dos experimentos, o algoritmo de estimação de parâmetros desenvolvido foi consolidado em uma aplicação computacional com interface gráfica [44]. A ferramenta encapsula integralmente todo o processamento e etapas para execução: carregamento dos arquivos de simulação gerados pelo ATP/ATPDraw, injeção controlada dos perfis de AWGN nos quatro níveis avaliados, processamento simultâneo pelos

métodos da Matriz de Admitância e da Matriz de Transmitância, e geração automática dos gráficos comparativos de erro e acurácia. Dessa forma, qualquer conjunto de simulações, organizadas no formato adotado neste trabalho, pode ser processado e avaliado com as mesmas ferramentas.

A Figura 32 mostra a interface principal no estado inicial, onde o usuário seleciona o diretório contendo os arquivos de simulação e configura os parâmetros físicos da linha sob análise: frequência de operação, comprimento do cabo, tolerância de estabilidade do critério de convergência fasorial e limite máximo de janelas de análise. Os cenários de ruído a serem processados são selecionados individualmente por meio de caixas de verificação, permitindo que o usuário execute subconjuntos dos quatro cenários avaliados neste trabalho de acordo com a disponibilidade computacional.

Figura 32 – Interface principal da ferramenta com configuração dos parâmetros físicos e seleção dos cenários de ruído.



Após a confirmação das configurações, o processamento é iniciado pelo botão *Executar Análise*. A Figura 33 ilustra a aplicação durante a execução, exibindo no painel de monitoramento e log o progresso em tempo real: a barra de progresso indica a fração de simulações já processadas, enquanto o registro textual detalha a simulação corrente, o cenário de ruído em execução e eventuais advertências de não-convergência do algoritmo de janelamento adaptativo. Esse mecanismo de rastreabilidade é relevante para estudos futuros, pois permite identificar quais combinações de parâmetros R, L e C apresentaram

maior dificuldade de convergência sob cada nível de degradação do sinal, orientando refinamentos no critério de estabilidade ou no limite máximo de iterações.

Concluído o processamento, a ferramenta gera automaticamente um arquivo com todos os valores estimados e de referência, além do gráfico consolidado de desempenho. As Figuras 34 e 35 apresentam as abas de resultados com a tabela comparativa de erros médios percentuais para R, L e C em cada cenário em formato de tabela e em dados gráficos, permitindo a comparação direta entre os métodos de Admitância e Transmitância sem necessidade de pós-processamento adicional.

Figura 33 – Painel de monitoramento durante a execução do processamento em massa das simulações.

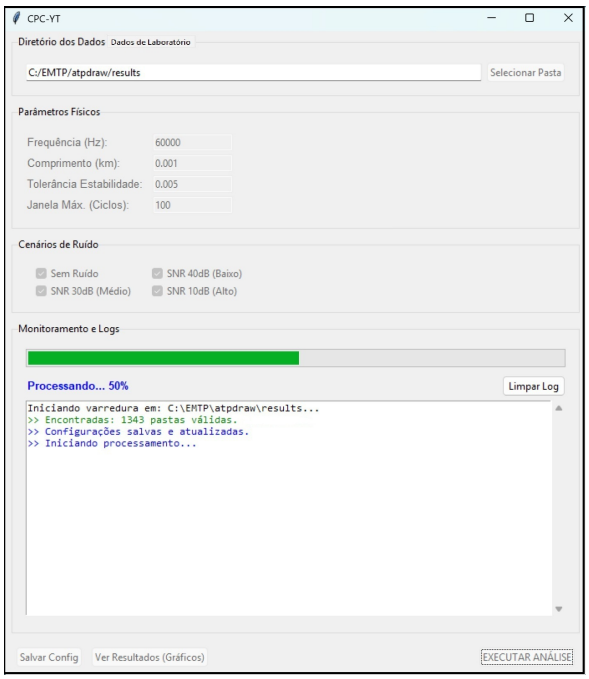


Figura 34 – Aba de resultados com tabela comparativa de desempenho entre os métodos avaliados.

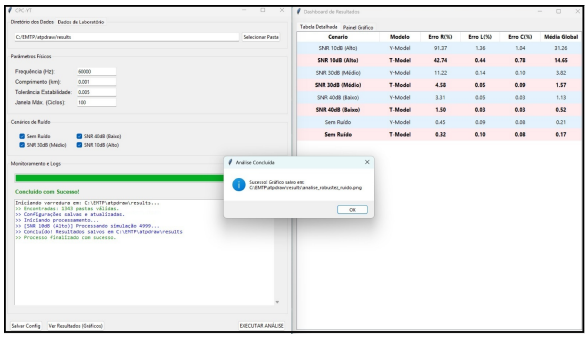
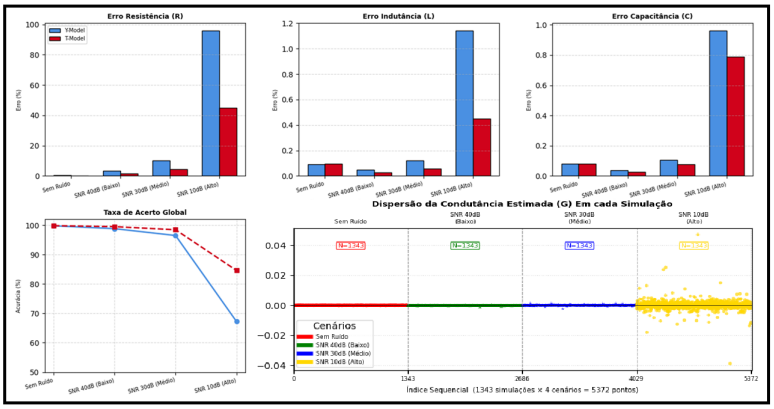


Figura 35 – Aba de dados gráficos de desempenho entre os métodos avaliados.

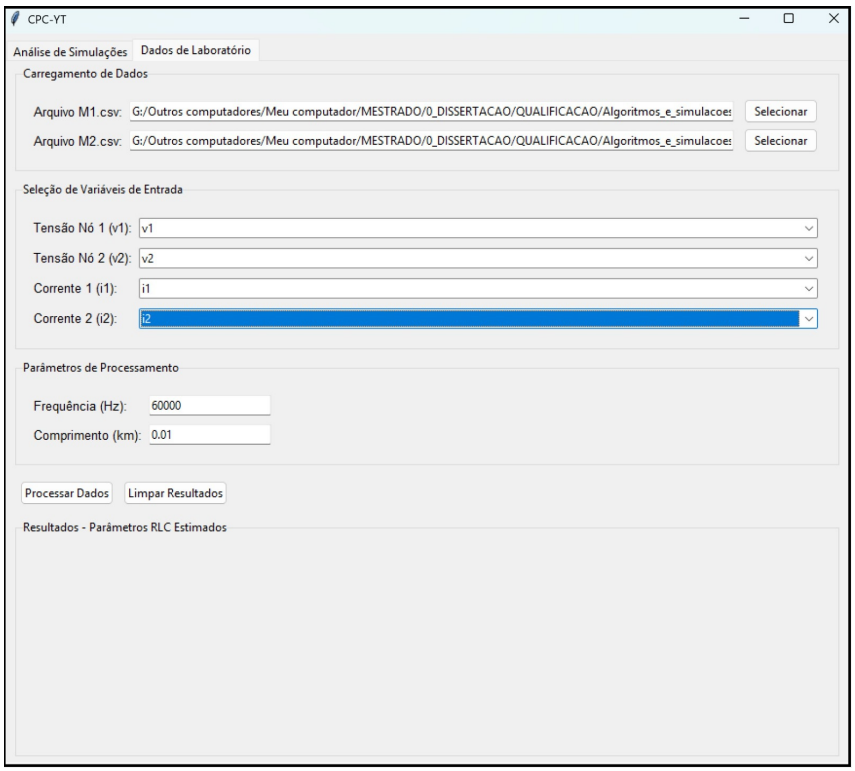


O código-fonte subjacente foi estruturado nos módulos `config.py`, `process.py` e

`main_engine.py`, seguindo um padrão de separação entre configuração, processamento de sinais e lógica de orquestração, facilitando a incorporação de novos métodos de estimação em versões futuras do trabalho.

Além do módulo de análise de simulações, a ferramenta incorpora uma segunda aba dedicada ao processamento de dados experimentais, denominada *Dados de Laboratório*. Essa aba reproduz diretamente o protocolo de medição adotado neste trabalho: o usuário carrega dois arquivos no formato `.csv`, correspondentes às medições M1 e M2 realizadas em instantes distintos (considerando a limitação de material referente ao Transformador de corrente de alta frequência). As colunas de tensão (v_1, v_2) e corrente (i_1, i_2) presentes em cada arquivo são mapeadas por menus de seleção, permitindo que o módulo se adapte a diferentes convenções de nomenclatura adotadas por distintos osciloscópios. A frequência de operação e o comprimento do cabo são configurados numericamente antes do acionamento do processamento, conforme ilustrado na Figura 36.

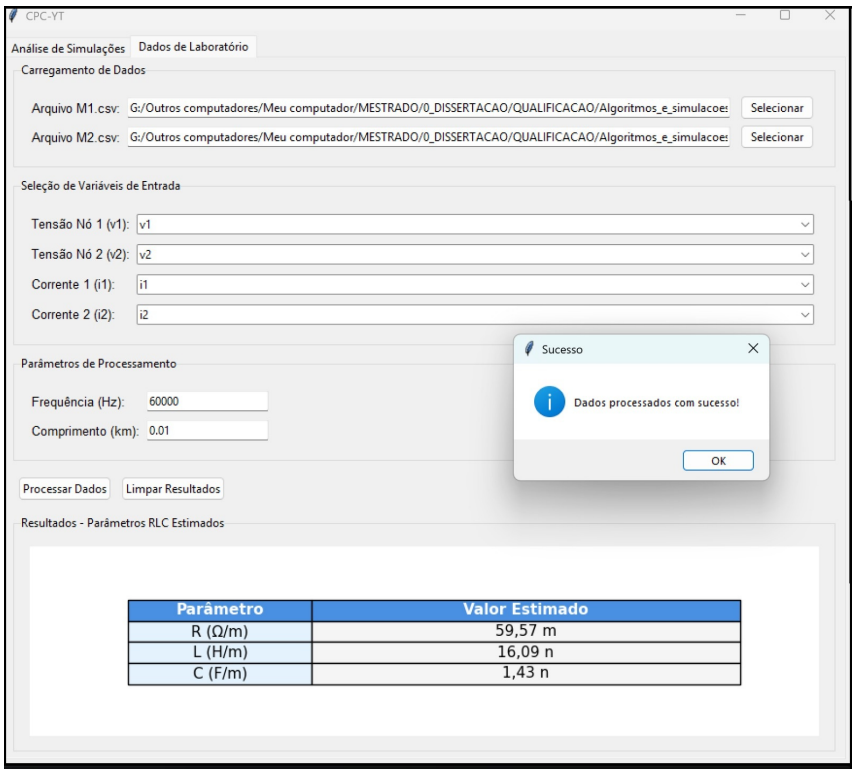
Figura 36 – Aba de dados de laboratório com carregamento dos arquivos M1 e M2 e mapeamento das variáveis de entrada para estimação experimental.



O resultado do processamento é exibido diretamente na interface na forma de uma tabela com os parâmetros distribuídos estimados por unidade de comprimento, resistência R (Ω/m), indutância L (H/m) e capacitância C (F/m), conforme apresentado na Figura 37. Os valores obtidos para o cabo de 6 mm² ensaiado neste trabalho, $R = 59{,}57$ mΩ/m, $L = 16{,}09$ nH/m e $C = 1{,}43$ nF/m, são consistentes com os registrados na Tabela 2 e serviram de base para a calibração do modelo de simulação confrontado ao ensaio de

degrau. A convergência entre os dois caminhos de validação, o numérico e o experimental, reforça que o algoritmo embarcado na ferramenta opera corretamente sobre dados reais de instrumentação, consolidando o método apresentado como um instrumento de pesquisa funcional e extensível para estudos futuros de caracterização de cabos de baixa tensão em redes de distribuição.

Figura 37 – Resultado da estimação de parâmetros distribuídos a partir das medições experimentais de bancada exibido na interface da ferramenta.



6 CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho uma metodologia para a estimação de parâmetros distribuídos em cabos de baixa tensão de curta extensão, fundamentada em formulações matriciais aplicadas a medições fasoriais em alta frequência. A abordagem foi estruturada de forma a superar uma limitação metrológica fundamental do problema: em ramais de serviço com comprimentos da ordem de poucos metros, as quedas de tensão observáveis na frequência fundamental de 60 Hz são comparáveis à incerteza dos instrumentos de medição convencionais, inviabilizando a aplicação direta dos estimadores clássicos. A adoção de excitação senoidal em 60 kHz, combinada a um algoritmo de extração fasorial com janelamento adaptativo e critério de estabilidade, permitiu contornar essa limitação e obter estimativas de R, L, C e G por unidade de comprimento a partir de instrumentação de laboratório convencional.

A validação em ambiente simulado, conduzida sobre 5376 cenários de teste gerados com 1344 combinações pseudo-aleatórias de parâmetros e quatro níveis de degradação do sinal, demonstrou que os dois métodos matriciais investigados, a Matriz de Admitância Nodal e a Matriz de Transmitância, apresentam comportamentos complementares frente ao ruído. O método da Admitância mostrou-se eficiente em condições de baixo ruído, além de ter uma implementação prática mais simples, enquanto o método da Transmitância demonstrou maior robustez numérica sob degradação severa do sinal, sustentado por uma formulação que isola diretamente a impedância série e a admitância *shunt* sem depender da subtração de tensões nodais próximas. Os parâmetros reativos L e C apresentaram erros médios inferiores a 1% mesmo no cenário de SNR de 10 dB, enquanto a resistência R, por depender do componente real de baixa magnitude das impedâncias, mostrou-se o parâmetro mais sensível à degradação do sinal, o que é consistente com as limitações físicas e numéricas inerentes ao problema e não constitui uma falha do algoritmo.

A aplicação da metodologia a medições experimentais obtidas em um cabo real de 6 mm² resultou em estimativas de $R = 59{,}57$ mΩ/m, $L = 16{,}09$ nH/m e $C = 1{,}43$ nF/m. Esses valores, inseridos em um modelo de simulação no ATPDraw parametrizado com duas seções π de 5 m cada, reproduziram o comportamento transitório do cabo em um ensaio de degrau independente com erro relativo de 4,38%, RMSE de 0,4176 V e MAE de 0,3584 V. Embora a frente de onda inicial não tenha sido reproduzida com exatidão total, resultado atribuído à sincronização digital entre as duas janelas de medição e a efeitos parasitas não modelados, a concordância obtida na região de regime permanente e na evolução geral da forma de onda é considerada satisfatória para o nível de instrumentação empregado e para o estágio atual de desenvolvimento da metodologia.

A comparação sistemática entre topologias de discretização revelou que duas seções π de 5 m são suficientes para representar um cabo de 10 m na faixa de frequências

investigada, fornecendo evidência empírica para orientar escolhas de modelagem em simuladores de transitórios eletromagnéticos como o ATP/ATPDraw. Esse resultado, embora obtido para uma configuração específica de cabo e frequência, sugere que o nível de discretização imposto pela topologia de dois segmentos captura os modos de propagação dominantes sem introduzir instabilidades numéricas associadas à subdivisão excessiva, aspecto que merece investigação mais aprofundada em estudos futuros com cabos de outras seções e comprimentos.

Por fim, os algoritmos desenvolvidos foram consolidados na ferramenta computacional, com interface gráfica e distribuição na forma de executável independente.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho, embora promissores, representam uma primeira etapa em uma linha de pesquisa mais ampla. As limitações identificadas ao longo do estudo apontam naturalmente para direções de investigação que podem amplificar significativamente o alcance e a precisão da metodologia proposta.

A extensão mais imediata diz respeito à expansão do modelo monofásico, com diferentes faixas de caracterização em frequência e para configurações bifásicas e trifásicas. A rede de baixa tensão brasileira opera predominantemente em sistemas a quatro fios, com acoplamentos mútuos entre condutores que não são capturados pela formulação monofásica adotada neste trabalho. A incorporação desses acoplamentos nas formulações matriciais de Admitância e Transmitância exige a manipulação de matrizes de ordem superior e a realização de ensaios com múltiplas condições de excitação simultânea, impondo requisitos adicionais de instrumentação e de processamento de sinais. A base metodológica e computacional estabelecida neste trabalho oferece um ponto de partida sólido para essa expansão, e a ferramenta computacional foi arquitetada de forma modular precisamente para facilitar essa incorporação.

Adicionalmente, propõe-se a investigação da estabilidade dos parâmetros utilizando o mesmo cabo ensaiado, porém com a disponibilidade de dois transformadores de corrente de alta frequência idênticos, permitindo a aquisição simultânea das grandezas nos dois terminais do cabo.

Por fim, a aplicação da metodologia a cabos com diferentes seções transversais, materiais condutores e tipos de isolação, em condições de temperatura controlada, permitiria a construção de uma base de dados de parâmetros distribuídos de cabos de baixa tensão tipicamente encontrados na rede de distribuição brasileira, recurso de grande utilidade para concessionárias e pesquisadores da área.

6.2 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS REALIZADAS DURANTE O MESTRADO

- *Educational Experiments to Demonstrate Theoretical Principles of Traveling Waves Using Low-Voltage Circuits*. 2025 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasília, Brasil, 2025, pp. 1–7. DOI: 10.1109/WCNPS69127.2025.11295911.
- *Low Voltage Service Line Energy Theft Detection Method Independent of Cable Parameters*, IEEE Transactions on Power Delivery. DOI: 10.1109/TPWRD.2025.3583952.
- *Alternative Low-Voltage Cable Model for Transient Studies*, 2024 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasília, Brasil, 2024, pp. 1–7. DOI: 10.1109/WCNPS65035.2024.10814322.

REFERÊNCIAS

[1] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.

[2] F. V. Lopes, J. M. Neto, D. Sarmento, H. Braz, E. Faustino, F. Braga, C. Protásio, Y. Molina, S. Cavalcante, E. Madruga, and J. Henriques, "Alternative low voltage cable model for transient studies," in *2024 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, 2024, pp. 1–7.

[3] P. Parvizi, M. Jalilian, A. M. Amidi, M. R. Zangeneh, and J.-R. Riba, "Technical losses in power networks: Mechanisms, mitigation strategies, and future directions," *Electronics*, vol. 14, no. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2079-9292/14/17/3442

[4] I. Pavičić, I. Ivanković, A. Župan, R. Rubeša, and M. Rekić, "Advanced prediction of technical losses on transmission lines in real time," in *2019 2nd International Colloquium on Smart Grid Metrology (SMAGRIMET)*, 2019, pp. 1–7.

[5] F. de Souza Savian, J. C. M. Siluk, T. B. Garlet, F. M. do Nascimento, J. R. Pinheiro, and Z. Vale, "Non-technical losses: A systematic contemporary article review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, p. 111205, 2021. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121004937

[6] K. Yotov, E. Hadzhikolev, and S. Hadzhikoleva, "Model for forecasting of electricity losses during transmission and distribution in an electricity system," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 69, pp. 93–98, 06 2021.

[7] International Energy Agency. (2020) Electricity. IEA, Paris. Accessed: 2026-04-04. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery/electricity

[8] W. Hu, Y. Yang, J. Wang, X. Huang, and Z. Cheng, "Understanding electricity-theft behavior via multi-source data," in *Proceedings of The Web Conference 2020 (WWW 2020)*, Taipei, Taiwan, 2020, pp. 2264–2274, accessed: 2022-01-17. [Online]. Available: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3366423.3380291

[9] P. Glauner, C. Glaeser, N. Dahringer, P. Valtchev, R. State, and D. Duarte. (2018) Non-technical losses in the 21st century: Causes, economic effects, detection and perspectives. Accessed: 2021-04-22. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/325297875_Non-Technical_Losses_in_the_21st_Century_Causes_Economic_Effects_Detection_and_Perspectives

[10] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), "Perdas de energia elétrica na distribuição 2025/2024," Brasil, 2024, relatório institucional da ANEEL. [Online]. Available: ArquivoPDF

[11] S. A. d. MORAIS FILHO, "Identificação de perdas não técnicas em redes de distribuição de energia elétrica," São Carlos, 2015.

[12] M. S. Saeed *et al.*, "Detection of non-technical losses in power utilities – a comprehensive systematic review," *Energies*, vol. 13, no. 18, p. 4727, 2020.

[13] C. N. Lu, S. C. Huang, and Y. L. Lo, "Non-technical loss detection using state estimation and analysis of variance," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2959–2966, 2013.

[14] J. Nagi *et al.*, "Nontechnical loss detection for metered customers in power utility using support vector machines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 1162–1171, 2010.

[15] ——, "Improving svm-based nontechnical loss detection in power utility using the fuzzy inference system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 1284–1285, 2011.

[16] M. M. Buzau *et al.*, "Detection of non-technical losses using smart meter data and supervised learning," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, 2019.

[17] M. Zanetti *et al.*, "A fraud detection system in low-voltage distribution networks using a smart meter platform," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017.

[18] M. I. Ibrahem *et al.*, "An algorithm for accurate detection and correction of technical and nontechnical losses using smart metering," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021.

[19] C. Furse *et al.*, "Detection and localization of cable faults by time and frequency domain measurements," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2010.

[20] X. Ma and Z. Yin, "Cable fault detection based on enhanced spread spectrum time domain reflectometry," *AIP Advances*, vol. 15, no. 2, 2025.

[21] Z. Yin *et al.*, "Online detection and assessment of cable insulation fault based on time–frequency domain reflectometry," *AIP Advances*, vol. 14, no. 3, 2024.

[22] S. Pan, Y. Zhang, J. Tang, B. Feng, L. Zhang, J. Zhao, and L. Zhang, "An enhanced feature extraction method for power cable fdr test results based on first-order derivatives," in *2023 Panda Forum on Power and Energy (PandaFPE)*, 2023, pp. 715–719.

[23] J. e. a. ESCOBEDO, "Location of fraudulent branch lines or faults in short-length low voltage lines," *Electric Power Systems Research*, 2020.

[24] H. Ungrad *et al.*, "Impact of designed line parameters on distance protection: Investigation on a 110 kV double circuit transmission line fault," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 2021.

[25] J. A. Martinez-Velasco, *Introduction to Transients Analysis of Power Systems with ATP*, 2020, pp. 1–9.

[26] T. T. Hoang *et al.*, "Harmonic resonance overvoltage analysis in a mixed overhead line and underground cable in transmission systems," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT Asia)*, 2023, iEEE Xplore document 10177315.

[27] H. Zhang *et al.*, "Online monitoring for underground power cable insulation based on resonance frequency analysis under chirp signal injection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 6, pp. 5279–5289, 2022, iEEE Xplore document 9739915.

[28] R. G. Olsen, *High Voltage Overhead Transmission Line Electromagnetics: Volume I.* Cham, Switzerland: Springer, 2018.

[29] C. R. Bayliss and B. J. Hardy, *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, 4th ed. Oxford: Newnes, 2012.

[30] J. D. Glover and M. S. Sarma, *Power System Analysis and Design*, 2nd ed. Boston: PWS Publishing Company, 1994.

[31] D. Franković, S. Vlahinić, and M. Živić Đurović, "Application of different least square methods for transmission line parameter estimation," in *2022 IEEE 12th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 2022, pp. 1–6.

[32] Celesc Distribuição S.A., "Especificação técnica: Cabos de potência de alumínio multiplexados," Celesc, Tech. Rep. Res. DDI Nº 134/2024, 2024.

[33] *Norma de Distribuição Unificada NDU–001: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária a Edificações Individuais*, Versão 7.0 ed., Grupo Energisa, João Pessoa, PB, 11 2024, trecho consultado na p. 37.

[34] EDP Distribuição Brasil, "Padrão técnico: Redes de distribuição aérea de baixa tensão," EDP Brasil, Tech. Rep. PTDTPDN00011, 2024.

[35] Roraima Energia, "Manual de especificações técnicas de materiais de redes de distribuição," Roraima Energia S/A, Tech. Rep., 2020.

[36] F. V. Lopes, J. M. R. d. S. Neto, H. D. M. Braz, T. M. Bezerra, I. M. L. Ursulino, D. S. Sarmento, F. B. S. Carvalho, C. P. d. Souza, Y. P. M. Rodriguez, S. Cavalcante, E. Madruga, J. Henriques, M. M. V. Menezes, and F. L. Loução, "Low voltage service line energy theft detection method independent of cable parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 40, no. 5, pp. 2974–2977, 2025.

[37] W. Luan, J. Liu, and et al., "Low voltage distribution network tn-s impedance identification considering single and three-phase hybrid connection," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 167 890–167 900, 2020.

[38] H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399, 1969.

[39] G. Paramo, A. Bretas, and S. Meyn, "Research trends and applications of pmus," *Energies*, vol. 15, no. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/15/5329

[40] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and I. T. Young, *Sinais e Sistemas*, 2nd ed. Prentice Hall / LTC, 1997, capítulo sobre Transformada Discreta de Fourier (DFT), pp. 477–500.

[41] P. Gomez, "Electromagnetic transient model reconstruction of generalized power transmission lines based on time-synchronized waveform measurements," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 173 895–173 908, 2025.

[42] A. Wehenkel, A. Mukhopadhyay, J.-Y. L. Boudec, and M. Paolone, "Parameter estimation of three-phase untransposed short transmission lines from synchrophasor measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 9, pp. 6143–6154, 2020.

[43] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. John Wiley & Sons, 2008.

[44] "Lvc parameters calculation," *GitHub*, s. d., disponível em: https://github.com/SSDaniel/LVC_parameters_calculation. Acesso em: 21 maio 2026.