

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRCIO GABRIEL MELO SILVA

**OTIMIZAÇÃO DA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE LINHA DE
TRANSMISSÃO UTILIZANDO DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL
SINCRONIZADA**

Itajubá

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRCIO GABRIEL MELO SILVA

**OTIMIZAÇÃO DA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE LINHA DE
TRANSMISSÃO UTILIZANDO DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL
SINCRONIZADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Frederico de Oliveira Passos

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira

Itajubá

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRCIO GABRIEL MELO SILVA

**OTIMIZAÇÃO DA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE LINHA DE
TRANSMISSÃO UTILIZANDO DADOS DE MEDIÇÃO FASORIAL
SINCRONIZADA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 12 de Dezembro de 2024, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira (Orientador) - UNIFEI;

Prof. Dr. Frederico de Oliveira Passos (Coorientador) – UNIFEI;

Prof. Dr. Aurélio Luiz Magalhães Coelho - UNIFEI

Prof. Dr. João Pedro Lopes Salvador - CEFET-RJ

Itajubá

2024

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha esposa Ana Carolina, minha filha Gabriela e ao meu filho Davi. Muito obrigado por todo suporte dado para o desenvolvimento deste trabalho e por ajudar nesta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda sabedoria e capacidade de desenvolver este trabalho.

Aos meus pais Marcos e Marcia por terem me incentivado a estudar e acreditar no meu potencial.

À minha esposa Ana Carolina por todo suporte e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por confiar em mim e por me apoiar nesta jornada da vida. Te amo!!! Obrigado aos meus filhos Gabriela e Davi que potencializaram ainda mais a vontade de me desenvolver e de ser um exemplo para nossa família.

Aos professores Paulo Márcio e Frederico pela orientação, suporte e confiança.

Aos meus colegas de curso, pela oportunidade do convívio e cooperação mútua.

Agradeço a Celeo por ter me dado a oportunidade de realizar o CEPSE onde toda esta jornada foi iniciada em 2019 através da iniciativa da Eng. Maria Rita e por me apoiar com informações que foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

RESUMO

Na literatura técnica são apresentados diferentes modelos matemáticos para modelagem de linha de transmissão (LT) que podem ser aplicados de acordo a natureza da LT e do estudo elétrico realizado. De forma ampla nos estudos elétricos os parâmetros das LTs são considerados constantes e possíveis variações significativas ao longo do tempo podem estar sendo negligenciadas. Adicionalmente na modelagem matemática de LTs utiliza-se dados construtivos que envolvem erros devido a fatores como imprecisões na resistência do solo, considerações de valor médio da altura dos condutores com relação ao solo, entre outros que podem acarretar em imprecisões no modelo da LT aplicado.

Com o advento de novas tecnologias, dentre elas a PMU, é possível obter fasores sincronizados no tempo de tensão e corrente em pontos geograficamente distantes entre si possibilitando a avaliação de novos métodos, ou melhoria dos métodos, de determinação de parâmetros de LTs.

Neste sentido este trabalho tem como objetivo propor um método capaz otimizar os parâmetros estimados de uma LT ao longo do tempo. Para realização desta atividade, além dos dados sincronizados de tensão e corrente, serão aplicadas modelos de matemáticos de LTs e otimização através de algoritmo genético.

O otimizador proposto tem como objetivo identificar os parâmetros concentrados de uma LT que melhor se aproximam do seu modelo real. O desempenho do estimador será avaliado através de simulações computacionais no ATP e MATLAB, assim como através de dados reais de medição de uma LT pertencente ao Sistema Interliga Nacional.

De forma a buscar validação do estimador proposto será apresenta uma aplicação da solução proposta em algoritmo de localização de faltas. Para o processo de validação serão utilizados dados reais capturados de uma LT e através do processo de otimização dos parâmetros estimados desta LT espera-se encontrar melhores resultados para os valores calculados de localização de faltas..

Palavras-chave: Algoritmo Genético, Linhas de Transmissão, Localização de Faltas, PMU.

ABSTRACT

In the technical literature, different mathematical models are presented for modeling transmission lines (LT) that can be applied according to the nature of the LT and the electrical study carried out. In electrical studies, LT parameters are generally considered constant and possible significant variations over time may be neglected. Additionally, in the mathematical modeling of LTs, construction data is used that involves errors due to factors such as inaccuracies in soil resistance, considerations of the average value of the height of conductors in relation to the ground, among others that can lead to inaccuracies in the applied LT model.

Additionally, with the advent of new technologies, including PMU, it is possible to obtain time-synchronized phasors of voltage and current at points geographically distant from each other, enabling the evaluation of new methods, or improvements to methods, for determining TL parameters. In this sense, this work aims to propose a method capable of optimizing the estimated parameters of a TL over time. To carry out this activity, in addition to synchronized voltage and current data, mathematical models of TLs and optimization through genetic algorithms will be applied.

The proposed optimizer will aim to identify the concentrated parameters of a TL that best approximate its real model. The estimator's performance will be evaluated through computational simulations in ATP and MATLAB, as well as through real measurement data from a .

In order to seek validation of the proposed estimator, an application of the proposed solution will be presented in a fault location algorithm for real LT events, seeking to find better results for the calculated fault location values.

Keywords: Genetic Algorithm, Transmission Lines, Fault Location, PMU.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação infinitesimal dos elementos de uma LT	29
Figura 2- Primeira PMU experimental desenvolvida no laboratório da Virginia Tech em 1980	30
Figura 3 - Evolução no tempo de PMUs e normas associadas	31
Figura 4 - Comparação dados sistema SCADA vs PMU	33
Figura 5 - Visão esquemática dos dados de entrada e saída das PMUs	36
Figura 6 - Arquitetura simplificada PMU - Sincronismo de tempo.....	37
Figura 7 - Expansão das PMUs no Brasil - Dados referentes ao ano de 2022.....	41
Figura 8 - Esquema de conexão típico de TC e TP no sistema elétrico.....	43
Figura 9 -Circuito equivalente de um transformador de corrente.....	45
Figura 10 - Modelo básico de um TPC.....	48
Figura 11 - Estrutura básica dos algoritmos evolucionários.....	52
Figura 12 - Simple Genetic Algorithm - Fluxograma Sintetizado.....	53
Figura 13 -Estrutura Algoritmo Genético.....	54
Figura 14 - Algoritmo aplicado para otimização de parâmetro de LT.....	58
Figura 15 - Parâmetros algoritmo genético	62
Figura 16 - Aplicação da função objetivo e EVA.....	63
Figura 17 - Curva típica - Grau de Evolução EVA.....	65
Figura 18 - Fluxograma do algoritmo genético utilizado neste trabalho	67
Figura 19 - Sensibilidade do parâmetro concentrado R1 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.	69
Figura 20 - Sensibilidade do parâmetro concentrado R0 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.	69
Figura 21 - Sensibilidade do parâmetro concentrado X1 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.	70
Figura 22 - Sensibilidade do parâmetro concentrado X0 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.	70
Figura 23 - Sensibilidade do parâmetro concentrado Y1 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.	70
Figura 24 - Sensibilidade do parâmetro concentrado Y0 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.	71
Figura 25 - Mapa elétrico indicando o ponto de conexão da LT 500kV Estreito x Nova Ponte	73
Figura 26: Esquema de transposição da LT 500kV Estreito x Nova Ponte	73
Figura 27 - Estrutura típica utilizada no projeto	75
Figura 28 - Arquitetura local da subestação	76
Figura 29 - Arquitetura simplificada - PMU vs PDC - Canais de Comunicação	76
Figura 30 - Esquema de utilização da ferramenta Historian Trending Tools	77
Figura 31 - Modelo criado no ATP	82
Figura 32 - Fluxograma - Validação do algoritmo com auxílio do ATP	83

Figura 33 - Grau de evolução e variação do comprimento- Cenário 01	86
Figura 34 - Grau de evolução e variação da resistência do solo - Caso 2.....	87
Figura 35 - Grau de evolução e variação da resistência do condutor - Cenário 03.....	89
Figura 36 - Grau de evolução e variação na altura do vão médio - Cenário 04.....	90
Figura 37 - Grau de evolução, variação na altura do vão médio e variação no comprimento da LT - Cenário 05	91
Figura 38 - Grau de evolução e variações na altura do vão médio, resistividade do solo e comprimento da LT - Caso 6.....	93
Figura 39 - Grau de evolução e variações na resistência do condutor, altura do vão médio, resistividade do solo e comprimento da LT encontrados - Caso 7.....	94
Figura 40 - Comparação Grau de Evolução.	95
Figura 41 - Plano RX -Z1	96
Figura 42 - Plano RX -Z0.....	96
Figura 43 - Plano GB -Y1	97
Figura 44 - Plano GB -Y0	97
Figura 45 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro $ Z1 $	98
Figura 46 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro $ Z0 $	98
Figura 47 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro $ Y1 $	99
Figura 48 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro $ Y0 $	99
Figura 49 - Grau de evolução LT - sem otimização - Anos de 2021 e 2024	100
Figura 50 - Grau de Evolução – Comparação Sistema com e sem otimização.....	102
Figura 51 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $ Z1 $ da LT em ohms.....	103
Figura 52 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $ Z0 $ da LT em ohms.....	104
Figura 53 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $ Y1 $ da LT em S.....	104
Figura 54 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $ Y0 $ da LT em S.....	105
Figura 55 - Comportamento das tensões na LT - Período de 24h – $ VSF $	106
Figura 56 - Comportamento das tensões na LT - Período de 24h - $ VRF $	106
Figura 57 - Comportamento das correntes na LT - Período de 24h - $ ISF $	107
Figura 58 - Comportamento das correntes na LT - Período de 24h - $ IRF $	107
Figura 59 - Grau de evolução - Período de 72h - Dados com o e sem otimização	108
Figura 60 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $ Z1 $ da LT em ohms	109
Figura 61 - - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $ Z0 $ da LT em ohms	109
Figura 62 - - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $ Y1 $ da LT em S	110
Figura 63 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $ Y0 $ da LT em S	110
Figura 64 - Comportamento das tensões na LT - Período de 72h – $ VSF $	111
Figura 65 - Comportamento das tensões na LT - Período de 72h – $ VRF $	111
Figura 66 - Comportamento das correntes na LT - Período de 72h – $ ISF $	112

Figura 67 - Comportamento das correntes na LT - Período de 72h – IRF 	112
Figura 68 - Grau de Evolução – Comparação Sistema com o e sem otimização.....	113
Figura 69 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 24h - Rastreamento de Z1 da LT em ohms	114
Figura 70 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 24h - Rastreamento de Z0 da LT em ohms	114
Figura 71 -Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 24h - Rastreamento de Y1 da LT em S	115
Figura 72 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de Y0 da LT em S	115
Figura 73 - Comportamento das correntes na LT - Período de 24h – IRF 	116
Figura 74 - Período de 72h - ISF 	117
Figura 75 - Carregamento da LT x Impedância Z1 - 0h a 24h.....	118
Figura 76 - - Carregamento da LT x Impedância Z1 - 24h a 48h	118
Figura 77 - - Carregamento da LT x Impedância Z1 - 48h a 72h	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do sistema SCADA vs PMU	34
Tabela 2 - Benefícios das PMUs	35
Tabela 3 - Requisitos mínimos PMU para desempenho em regime permanente	39
Tabela 4 - Dados de entrada para cálculo dos parâmetros de LT	59
Tabela 5 - Análise dos parâmetros de LT	60
Tabela 6- Parâmetros AG	66
Tabela 7 - Parâmetros da Linha de Transmissão - LT 500kV Estreito x Nova Ponte	72
Tabela 8 - Características construtivas - Projeto Básico.....	74
Tabela 9 - Características dos cabos condutores e para-raios.....	74
Tabela 10 - Dados originais - Comparação ATP x MATLAB	83
Tabela 11 - Cenários teóricos simulados	84
Tabela 12 - Resultado da simulação - Primeiro cenário	85
Tabela 13 - Resultado da simulação - Segundo cenário	86
Tabela 14 - Resultado da simulação - Terceiro cenário.....	88
Tabela 15 - Resultado da simulação - Quarto cenário	89
Tabela 16 - Resultado da simulação - Quinto cenário	91
Tabela 17 - Resultado da simulação - Sexto cenário	92
Tabela 18 - Resultado da simulação - Sétimo cenário	93
Tabela 19 - Dados de impedância de LT - Antes e depois da otimização	121
Tabela 20 - Resultado -Localizador de faltas	121
Tabela 21 - Dados de impedância de LT - Antes e depois da otimização	121
Tabela 22 - Resultado - Localizador de faltas	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	Algoritmo Evolutivo
AG	Algoritmo Genético
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
EF	Erro de frequência
EE	Estratégia Evolutiva
IED	<i>Intelligent electronic device</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
ROCOF	<i>Rate of change of frequency</i>
TC	Transformador de Corrente
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TI	Transformador de instrumento
TP	Transformador de Potencial
TVE	<i>Total Vector Error</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Motivação.....	18
1.2	Objetivo.....	19
1.3	Estrutura da dissertação.....	20
2	Revisão Teórica.....	21
2.1	Considerações iniciais	21
2.2	Estado da arte	22
2.3	Cálculo de parâmetros de linhas de transmissão	23
2.4	Sistema de Medição Sincrofasorial	30
2.4.1	Revisão das Normas de Sincrofasores.....	32
2.4.2	Classes de desempenho	39
2.4.3	Características técnicas para integração das PMUs ao SIN	40
2.5	Erros de instrumentos de medição.....	42
2.5.1	Erros em transformadores de corrente.....	44
2.5.2	Erros em Transformadores de Potencial Capacitivo	47
2.6	Otimizador por algoritmo genético	50
2.6.1	Conceitos de otimização.....	50
2.6.2	Algoritmos Evolutivos	51
2.6.3	Algoritmo Genético.....	52
2.7	Considerações Finais.....	54
3	Algoritmos e Aplicação Proposta.....	56
3.1	Considerações iniciais	56
3.2	Metodologia Proposta	56
3.2.1	Visão Geral.....	56
3.2.2	Definição da estrutura do indivíduo no AG	58
3.2.3	População e processo evolutivo no AG.....	62
3.3	Sensibilidade na variação dos elementos	68
3.4	Características do Sistema Utilizado.....	72
3.4.1	Linha de Transmissão.....	72
3.4.2	Sistema de Medição Sincrofasorial Utilizado	75
3.5	Considerações finais.....	77
4	Simulações e Resultados	80
4.1	Considerações iniciais	80
4.2	Ferramentas de auxílio MATLAB e ATP	81
4.3	Validação do algoritmo utilizando modelo teórico	82
4.3.1	Cenários de testes teóricos no ATP	84

4.4	Análise dos parâmetros da LT sem otimização.....	100
4.4.1	Otimizando os Casos Apresentados	101
4.5	Validação do método utilizando dados de oscilografia e algoritmo de localização de falta	119
4.5.1	Evento 1 – Desligamento ocorrido 13/07/2020.....	121
4.5.2	Evento 2 – Desligamento ocorrido 29/10/2020.....	121
4.6	Considerações Finais.....	122
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	124
5.1	Conclusões	124
5.2	Trabalhos Futuros.....	126
6	Referências Bibliográficas	128

1 Introdução

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são formados por três subsistemas que são geração, transmissão e distribuição. Dentro deste contexto as linhas de transmissão (LTs) são responsáveis pelo transporte de energia elétrica das usinas geradoras até os grandes centros de carga. De acordo com o ONS [1], até 2023 o sistema interligado brasileiro era composto por 171.640 km de linhas de transmissão com níveis de tensão igual ou superior a 230kV, demonstrando a importância das mesmas para o sistema elétrico. A modelagem de linhas de transmissão não é algo trivial e na literatura técnica são apresentados diferentes modelos matemáticos que podem ser aplicados de acordo a natureza da linha de transmissão e do estudo elétrico que se deseja realizar. Para o caso de modelos mais complexos, onde são utilizados parâmetros distribuídos, as modelagens são realizadas por equações de onda e os parâmetros são dependentes da variação no tempo e no espaço e, assim, as linhas de transmissão são modeladas por equações diferenciais.

Os parâmetros das linhas de transmissão são necessários para realização de diferentes estudos elétricos fundamentais para o planejamento e operação do sistema como estudos de proteção, curto-circuito, fluxo de potência e outros. Tratando mais especificamente sobre a proteção de sistemas elétricos, pode-se destacar que as informações das LTs são utilizadas para a parametrização das funções de proteção de distância, sendo tal função aplicada na grande maioria das LTs.

Para modelar matematicamente as LTs, utilizam os dados construtivos da LT [2]. Esses cálculos envolvem erros que podem ser atribuídos aos diversos fatores, tais como: às variações da resistividade e da permissividade do solo e a sua dependência da frequência [34]; variações no carregamento da linha; variação da altura do vão médio dos condutores com relação ao solo; variações nas estruturas típicas das torres consideradas no projeto; entre outros. Desta forma, considerando que estes fatores não estejam sendo refletidos nos cálculos, é possível concluir que parâmetros diferentes dos verdadeiros estão sendo obtidos e aplicados nos estudos.

Os parâmetros das LTs utilizados nos estudos de proteção são considerados constantes e possíveis variações ao longo do tempo podem estar sendo negligenciadas. Ao longo deste trabalho será demonstrado que os parâmetros das LTs dependem de dados como, por exemplo, altura dos condutores com relação ao solo, resistividade do solo e geometria dos circuitos que

por sua vez podem sofrer alterações devidas às condições do ambiente ou por variações das estruturas das torres e características do solo ao longo da linha. Adicionalmente, durante a etapa de comissionamento e ao longo do período de operação das LTs não é usual a utilização de testes para validar os parâmetros das mesmas e confirmar se após construção os dados teóricos de projeto são similares aos reais. Com base no exposto, este trabalho propõe apresentar um método capaz de otimizar os parâmetros das LTs ao longo do tempo através do uso de medições de sincrofasores, equações de onda e algoritmo genético.

1.1 Motivação

Os parâmetros de LTs também são utilizados para realização de uma grande variedade de estudos elétricos como estabilidade, curto-circuito, tensões transitórias de manobras, proteção de sistemas elétricos, estudos de fluxo de potência e outros. Estes estudos são fundamentais para operação segura do setor elétrico e são utilizados para elaboração de projetos básico e executivo de novos empreendimentos.

Durante o cálculo dos parâmetros das LTs são realizadas algumas considerações, tais como: estruturas idênticas ao longo de toda a linha; altura única das estruturas e flecha do condutor ao longo de todo trajeto; e resistência do solo constante ao longo de todo percurso. Estas aproximações podem provocar erros na determinação dos parâmetros da linha. Adicionalmente, conforme será analisado neste trabalho, os parâmetros podem mudar dinamicamente ao longo da operação da linha de transmissão, impactados por fatores como, por exemplo, carregamento da linha e variações de temperatura do condutor.

Conhecendo com melhor precisão os parâmetros das LTs e as possíveis variações ao longo do tempo é possível obter melhor exatidão nos estudos dos sistemas elétricos através de informações mais exatas dos parâmetros das linhas e obter maior segurança na operação e expansão dos sistemas elétricos.

No que tange ao tema de proteção de sistemas elétricos, é comumente utilizada a função de distância que na sua filosofia de ajuste leva em consideração valores mais conservadores para absorver os erros de modelagem e dos instrumentos de medição. Desta forma, determinando com mais exatidão e dinamismo os parâmetros das linhas será possível ter um melhor refinamento dos ajustes da função de distância. Adicionalmente, conhecendo as variações dos parâmetros das LTs ao longo tempo será possível avaliar a relevância de criar uma metodologia para determinação de parametrização dinâmica de dispositivos de proteção.

1.2 Objetivo

Os métodos tradicionais de determinação de parâmetros de linha de transmissão baseados na geometria da LT apresentam aproximações que inserem erros na determinação dos parâmetros da linha. O desenvolvimento de novas tecnologias permite avaliar e desenvolver novos métodos de determinação e otimização de parâmetros de LTs de forma a obter parâmetros mais próximos do modelo real de uma LT. Desta forma este trabalho tem como objetivos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de cálculo de parâmetros de LTs baseados nos dados geométricos das linhas, bem como apresentar ao leitor os erros associados ao método;
- Apresentar os conceitos associados aos *Phasor Measurement Units* (PMU) e propor metodologia para otimização dos parâmetros de uma linha de transmissão baseados em dados reais de medição de fasores sincronizados;
- Avaliar o comportamento dinâmico dos parâmetros de uma linha ao longo do tempo e verificar possíveis variações ao longo desse tempo, utilizando medições reais de linha de transmissão pertencente ao Sistema Interligado Nacional (SIN);
- Propor algoritmo para otimização dos parâmetros de uma linha de transmissão baseado em dados de PMU e utilizando algoritmo genético;
- Através de modelos teóricos validar o algoritmo e realizar o rastreamento das variações dos parâmetros de uma LT;
- Propor novos parâmetros para a linha de transmissão com base nas medições reais de PMU e avaliar o impacto destes novos ajustes em algoritmos de localização de falta.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, a saber:

- O capítulo 2 apresenta uma revisão sobre o contexto de estimação de parâmetros de LT e as bases teóricas sobre modelagem. Também são apresentados conceitos importantes sobre medição sincronizada fasorial, erros em transformadores de instrumentos e algoritmo genético;
- O capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada para os objetivos de otimização dos parâmetros de LTs. Neste capítulo será apresentado a metodologia baseada em dados de PMU e o algoritmo genético para solução do problema levantado. Adicionalmente será apresentada a linha de transmissão utilizada para desenvolvimento deste trabalho e os *softwares* utilizados;
- O capítulo 4 apresenta resultados obtidos com base na metodologia apresentada. Serão mostrados resultados com base em modelos teóricos. Também serão apresentadas avaliações das possíveis variações dos parâmetros das linhas ao longo do tempo e os impactos da otimização dos parâmetros em cálculos de localização de faltas;
- O capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho baseado nos resultados alcançados e oportunidades de trabalhos futuros baseado no estudo.

2 Revisão Teórica

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos e as revisões bibliográficas necessárias para compreensão deste trabalho. Apesar de ser um assunto antigo, a estimação de parâmetros de linha de transmissão ganha novas perspectivas de estudo com o desenvolvimento de novas tecnologias. O cálculo de parâmetros de LTs baseado nos dados geométricos da linha são utilizados em projetos básicos de novos empreendimentos, porém durante a fase de construção e comissionamento destas obras não é usual a realização de testes de validação de parâmetros da LT. Como abordado anteriormente estes dados são utilizados em diversos estudos elétricos de extrema relevância para o planejamento e operação do sistema elétrico.

Sendo assim, esta seção se inicia com uma revisão bibliográfica relacionada ao desenvolvimento tecnológico associado as PMUs e sobre estudos recentes relacionados a estimação de parâmetros de linhas de transmissão.

Dentro deste contexto, além de abordar evolução tecnológica das PMUs, será apresentada uma revisão teórica sobre cálculo de parâmetros teóricos de LTs utilizando dados geométricos das mesmas. Esta revisão é relevante para o trabalho pois, além de estudar a metodologia de cálculo de parâmetros de LTs, será realizada discussão sobre os erros associados ao método de determinação de parâmetros. A análise destes erros também é objeto de estudo deste trabalho.

Este capítulo também apresenta uma revisão teórica da norma IEEE C37.118 que estabelece requisitos mínimos para unidades de medição fasorial sincronizada. Além de apresentar os conceitos da norma, esta revisão apresenta as características de norma que demonstram a viabilidade técnica para utilização das PMUs no desenvolvimento deste trabalho. Também serão apresentados os requisitos mínimos exigidos nos Procedimentos de Rede do ONS, submódulo 2.16, que servem para implantar as PMUs no SIN.

Dado que as PMUs recebem dados reais de medição vindos dos transformadores de instrumentos, TCs e TPs, os erros incluídos por estes equipamentos na cadeia de medição das grandezas elétricas do sistema se tornam relevantes para o estudo.

Para finalizar este capítulo serão apresentados conceitos sobre algoritmos de otimização aplicados para soluções de problemas complexos, o que seria bem difícil através do uso de métodos determinísticos.

2.2 Estado da arte

Em [3] é apresentada uma abordagem sobre o início da evolução tecnológica que atualmente permite que as PMUs sejam economicamente viáveis, bem como sobre as ferramentas que têm sido desenvolvidas e aplicadas nas análises de sistemas elétricos de potência relacionadas a estimação de estados, controles dinâmicos e proteção de sistemas elétricos. Também são apresentados possíveis benefícios das PMUs com relação aos sistemas de proteção com destaque para a proteção de distância adaptativa.

São apresentados em [4] estudos sobre proteção de distância adaptativa utilizando PMU. Os autores avaliaram propostas para o cálculo das impedâncias em situações de regime permanente. Realizaram modelagem e equacionamento a partir de um modelo PI de uma linha de transmissão e são apresentados resultados baseados em simulações, porém não há abordagem aplicando equações de onda, componentes simétricos e medições reais de sistemas elétricos.

Técnicas adaptativas de localização de falha baseadas em dados de PMU em LTs são avaliadas em [5] e [6]. Nestes trabalhos através das tensões e correntes, sincronizadas no tempo, de ambos os terminais da LT, e do conhecimento dos parâmetros de resistência, indutância, admitância e condutância da LT, os autores estabelecem uma metodologia para aprimorar a localização de faltas através de cálculos utilizando equações de onda das LTs. Os referidos trabalhos têm foco principal no aprimoramento da localização de faltas e não realizam abordagem relacionada ao mapeamento de variações dos parâmetros da LT ao longo do tempo.

Um novo algoritmo de monitoração da operação da terceira zona do relé de proteção de distância é proposto por [7] para identificar faltas externas ou internas à LT. O trabalho propõe o monitoramento do fluxo de potência ativa e reativa através de PMUs instaladas nos barramentos próximos à LT protegida. Através de um estudo baseado nos fluxos das potências ativas e reativas e de simulações realizadas na plataforma MATLAB/Simulink é proposta uma metodologia de aprimoramento.

Em [8] o autor apresenta metodologia para estimação dos parâmetros de LTs por meio de medições em seus terminais. Na metodologia aplicada, a estimação é realizada utilizando como dados de entradas as informações dos parâmetros iniciais da linha. O cálculo é realizado

utilizando dados de faltas, de modo que é necessário conhecer o ponto de falta e as medições dos períodos pré-falta e durante a falta para curtos-circuitos. Este trabalho, limitou o estudo a eventos monofásicos. O referido trabalho apresenta solução utilizando dados de falta e algoritmo evolutivo para obtenção dos dados apresentando metodologia diferente do desenvolvido nesta dissertação. Por fim, o estudo utiliza somente dados simulados para validação da metodologia.

Adicionalmente, com relação a estimação de parâmetros o tema permanece em estudo conforme apresentado em [2]. Os parâmetros de LTs são amplamente utilizados em diversos estudos do sistema de transmissão. Desta forma, quanto melhores as informações dos parâmetros, melhores os resultados dos estudos que as utilizam. O trabalho em questão apresenta diferentes metodologias de estimação de parâmetros de LTs que podem ser baseados em métodos de determinação pela geometria das torres, características e arranjo dos condutores ou pela estimação utilizando medições de forma ampla. Os métodos de determinação pela geometria são baseados no modelo teórico da LT onde diversas considerações e aproximações são realizadas podendo provocar erros na determinação dos parâmetros. Os cálculos baseados na determinação dos parâmetros pela geometria das torres consideram o sistema estático e variações ao longo do tempo não sendo levadas em consideração.

Conforme apresentado em [2], os métodos baseados em medições do sistema podem apresentar melhor desempenho por registrar dados do sistema efetivamente implantados e identificar variações ao longo do tempo. Para a determinação de parâmetros utilizando medições é possível utilizar dados advindos de PMU ou de oscilógrafos. Com a expansão das PMUs este método vem se tornando cada vez mais estudado dado, que as unidades de medição sincrofásorial, por definição, permitem obter amostras sincronizadas no tempo e a comparação de grandezas nos diferentes terminais de uma LT.

2.3 Cálculo de parâmetros de linhas de transmissão

A modelagem matemática de componentes de um sistema elétrico consiste na representação de um fenômeno físico através de circuitos equivalentes que devem representar os efeitos envolvidos da forma mais fidedigna possível. A utilização de modelos matemáticos permite a realização de estudos viabilizando análise de sistemas, avaliação de comportamento permitindo uma melhor compreensão do sistema e o desenvolvimento de novas aplicações e melhorias nos projetos.

As LTs exibem propriedades elétricas de indutância (L), capacitância (C), resistência (R) e condutância (G) que são essenciais para a modelagem matemática das mesmas. Os referidos parâmetros apresentam variações de acordo com aspectos como comprimento, frequência do sistema, geometria das estruturas, resistividade do solo, altura média dos condutores em relação ao solo e características dos condutores, presença de cabos para-raios e outros aspectos. A manipulação destes dados não é algo trivial e para o cálculo dos parâmetros assumem-se algumas hipóteses como resistividade do solo e altura média do condutor constante ao longo de todo percurso, geometria semelhante em todas as estruturas e outros aspectos. Para calcular estes parâmetros utilizam-se métodos matemáticos e técnicos conforme apresentados em [9], [10] e [11].

Outro importante aspecto com relação ao cálculo de parâmetros de LTs está relacionado às características das linhas que podem ser classificadas como curta, média e longa. Nos modelos de LTs curta os efeitos de propagação de onda e as capacitâncias são desconsideradas. No modelo de linha média os parâmetros distribuídos ao longo da LT também são desconsiderados, porém os efeitos da capacitância são incluídos na modelagem. Em modelos de linha longa os parâmetros são distribuídos por elementos infinitesimais. O modelo de linha de transmissão para linhas longas é o mais abrangente e será abordado neste trabalho.

Sejam as equações diferenciais (1) e (2) de tensão e corrente por unidade de comprimento.

$$-\left[\frac{d\dot{V}_{fase}}{dx}\right] = [Z'_{fase}][\dot{I}_{fase}] \quad (1)$$

$$-\left[\frac{d\dot{I}_{fase}}{dx}\right] = [Y'_{fase}][\dot{V}_{fase}] \quad (2)$$

As equações diferenciais de segunda ordem da LT para uma frequência constante, podem ser escritas em função de sua impedância longitudinal e sua admitância transversal.

$$-\left[\frac{d^2\dot{V}_{fase}}{dx^2}\right] = [Z'_{fase}]\left[\frac{d\dot{I}_{fase}}{dx}\right] \quad (3)$$

$$-\left[\frac{d^2\dot{I}_{fase}}{dx^2}\right] = [Y'_{fase}]\left[\frac{d\dot{V}_{fase}}{dx}\right] \quad (4)$$

Realizando manipulações matemáticas e substituindo as equações (1), (2) em (3) e (4), resulta em (5) e (6).

$$-\left[\frac{d^2\dot{V}_{fase}}{dx^2}\right] = [Z'_{fase}][Y'_{fase}][\dot{V}_{fase}] \quad (5)$$

$$-\left[\frac{d^2\dot{I}_{fase}}{dx^2}\right] = [Y'_{fase}][Z'_{fase}][\dot{I}_{fase}] \quad (6)$$

Onde:

$[Z'_{fase}]$ é a matriz de impedância longitudinal por unidade de comprimento;

$[Y'_{fase}]$ é a matriz de admitância transversal por unidade de comprimento;

$[\dot{V}_{fase}]$ é o vetor de tensões transversais entre cada uma das fases e a terra;

$[\dot{I}_{fase}]$ é o vetor de correntes longitudinais nas n fases;

Neste trabalho serão abordadas LTs trifásicas. Desta forma os vetores $[\dot{V}_{fase}]$ e $[\dot{I}_{fase}]$ possuem dimensões 3×1 .

As matrizes $[Z'_{fase}]$ e $[Y'_{fase}]$ em (7) tem dimensão 3×3 e já contém parâmetros próprios e mútuos da linha.

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \quad [Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

A seguir serão apresentadas de forma simplificada as principais equações envolvidas nos cálculos dos elementos das matrizes Z e Y . A apresentação de todos os conceitos envolvidos e desenvolvimentos das equações são demasiadamente extensos e não serão abordados neste trabalho, focando apenas na apresentação dos cálculos que irão auxiliar na compreensão e desenvolvimento do tema. É possível obter melhor compreensão das equações através da leitura das referências [10] e [12].

A impedância longitudinal de uma LT [10] pode ser dividida em três componentes, conforme (8):

$$Z_{total} = Z_{int} + Z_{ext} + Z_{solo} \quad (8)$$

Z_{int} = impedância interna do condutor;

Z_{ext} = impedância externa do condutor;

Z_{solo} = impedância devido ao efeito da terra;

Considerando o método de Carson aproximado [10], utilizam-se as equações (9) e (10) para obtenção dos elementos da matriz de impedâncias.

$$Z_{mm} = R_{int} + 0,000988f + j0,00125664f \ln\left(\frac{D_e}{RMG_m}\right) \quad \Omega/\text{km} \quad (9)$$

$$Z_{mn} = 0,000988f + j0,00125664f \ln\left(\frac{D_e}{d_{mn}}\right) \quad \Omega/\text{km} \quad (10)$$

Onde:

R_{int} = resistência em corrente alternada com efeito pelicular incluso em Ω/km ;

f = frequência em Hz;

$D_e = 658,68 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$, onde ρ é a resistividade do solo $\Omega.m$;

RMG_m = é o raio médio geométrico do condutor em metros;

d_{mn} = é a distância entre os condutores;

Os elementos da matriz de capacitância podem ser calculados com base nas equações (11) e (12) [10].

$$A_{mm} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{H_{kk}}{D_{kk}}\right) \quad (11)$$

$$A_{mn} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{H_{km}}{D_{km}}\right) \quad (12)$$

Onde:

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$;

D_{kk} = é o raio médio geométrico em [m];

D_{km} = distância entre os condutores k e m em [m];

H_{km} = é a distância entre o condutor k e a imagem do condutor m em [m];

H_{kk} = é a distância entre o condutor k e a sua própria imagem em [m];

As equações diferenciais de segunda ordem (5) e (6), cuja soluções estão representas pelas equações (13) e (14), definem o comportamento das tensões e correntes ao longo de toda a linha de transmissão.

$$\dot{V} = A_1 e^{\sqrt{ZY}x} + A_2 e^{-\sqrt{ZY}x} \quad (13)$$

$$\dot{i} = \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} A_1 e^{\sqrt{ZY}x} - \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} A_2 e^{-\sqrt{ZY}x} \quad (14)$$

As constantes A_1 e A_2 são determinadas pela condição de contorno. Quando $x = 0$ as tensões e correntes são iguais ao do terminal de carga.

Sendo $\dot{V}(0) = \dot{V}_r$ e $\dot{i}(0) = \dot{i}_r$ pode-se escrever que:

$$\dot{V}_r = A_1 + A_2 \quad (15)$$

$$\dot{i}_r = \frac{1}{\sqrt{Z/Y}} (A_1 - A_2) \quad (16)$$

Manipulando as equações (15) e (16) tem-se (17) e (18):

$$A_1 = \frac{\dot{V}_r + \sqrt{\frac{Z}{Y}} \dot{i}_r}{2} \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{\dot{V}_r - \sqrt{\frac{Z}{Y}} \dot{i}_r}{2} \quad (18)$$

Definindo $Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ e $\gamma = \sqrt{ZY}$ e realizando as substituições das equações (17) e (18) em (13) e (14) e organizando os elementos das equações pode-se escrever as soluções das equações das tensões e corrente conforme (19) e (20).

$$\dot{V}(x) = \dot{V}_R \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) + Z_c \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \dot{I}_R \quad (19)$$

$$\dot{I}(x) = \frac{1}{Z_c} \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \dot{V}_R - \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) \dot{I}_R \quad (20)$$

Após a manipulação das equações obtém-se (21).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_S \\ \dot{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ Z_c^{-1} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad (21)$$

Onde \dot{V}_S e \dot{I}_S são, respectivamente, os fasores de tensão e corrente no terminal *Sender* e \dot{V}_R e \dot{I}_R são, respectivamente, os fasores de tensão e corrente no terminal *Receiver*.

Finalizando as etapas de demonstração teórica as matrizes $[Z'_{fase}]$ e $[Y'_{fase}]$ estão apresentadas em (22) e (23) em componentes simétricas. A passagem das matrizes (20) e (21) para o modelo em componentes simétricas também incidem em hipóteses simplificadoras. Para as matrizes (22) e (23) sejam diagonais as impedâncias próprias e mutuas da LT devem ser iguais entre si o que pode não ser necessariamente verdade devida as geometrias das torres.

$$[Z_{012}] = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_S + 2Z_M & 0 & 0 \\ 0 & Z_S - Z_M & 0 \\ 0 & 0 & Z_S - Z_M \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[Y_{012}] = \begin{bmatrix} Y_0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_S + 2Y_M & 0 & 0 \\ 0 & Y_S - Y_M & 0 \\ 0 & 0 & Y_S - Y_M \end{bmatrix} \quad (23)$$

Onde:

$[Z_S]$ impedância própria;

$[Y_S]$ admitância própria;

$[Z_M]$ impedância mútua;

$[Y_M]$ admitância mútua;

Z_0, Z_1 e Z_2 são impedâncias de sequência zero, positiva e negativa respectivamente;

Y_0, Y_1 e Y_2 são impedâncias de sequência zero, positiva e negativa respectivamente;

Calculados os valores de $\dot{V}_{S0}, \dot{V}_{S1}$ e \dot{V}_{S2} e $\dot{I}_{S0}, \dot{I}_{S1}$ e \dot{I}_{S2} as relações entre as componentes de fase e componentes simétricas das tensões e correntes são dar por (24) e (25), sendo o operador $a = e^{j120^\circ}$

$$[\dot{V}_{abc}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{S0} \\ \dot{V}_{S1} \\ \dot{V}_{S2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$[\dot{I}_{abc}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{S0} \\ \dot{I}_{S1} \\ \dot{I}_{S2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

A Figura 1 mostra a representação infinitesimal dos elementos de uma linha de transmissão.

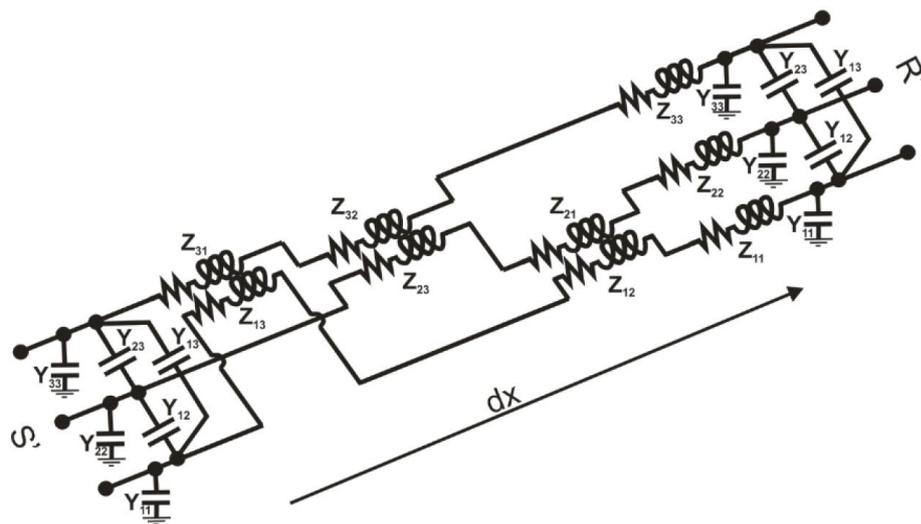


Figura 1- Representação infinitesimal dos elementos de uma LT

2.4 Sistema de Medição Sincrofasorial

As unidades de medição fasorial utilizando sincronismos através de sistemas *Global Positioning System* (GPS) começaram a ser desenvolvidas e testadas pela primeira vez em 1980 pelo *POWER SYSTEM RESEARCH LABORATORY OF VIRGINIA TECH*, sendo este o primeiro sistema desenvolvido com objetivo de obter medições sincronizadas no tempo em diferentes pontos geográficos de um sistema elétrico de potência. A Figura 2 mostra a primeira PMU experimental conforme descrita pelo autor [13].

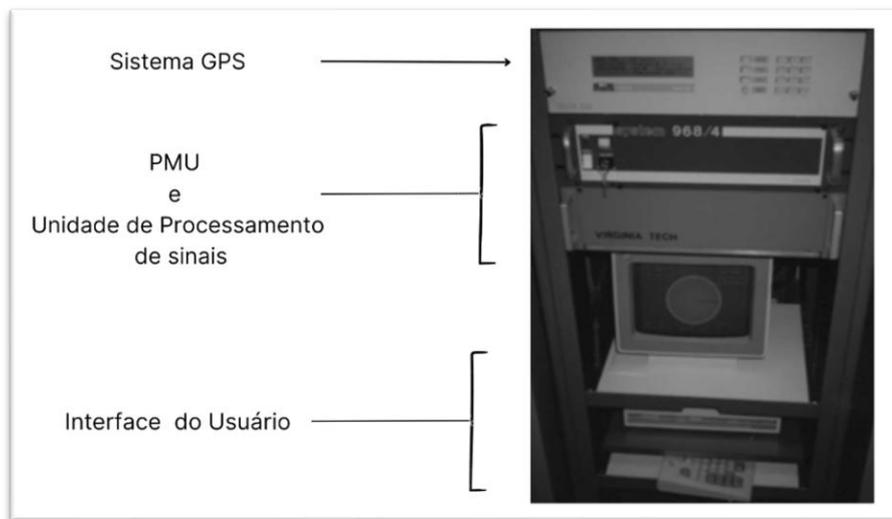


Figura 2- Primeira PMU experimental desenvolvida no laboratório da Virginia Tech em 1980

Após início do desenvolvimento da PMU nos EUA, em 1980, foram iniciados investimentos para o aprimoramento destes sistemas, os quais tiveram evolução conforme mostrado na linha do tempo da Figura 3.

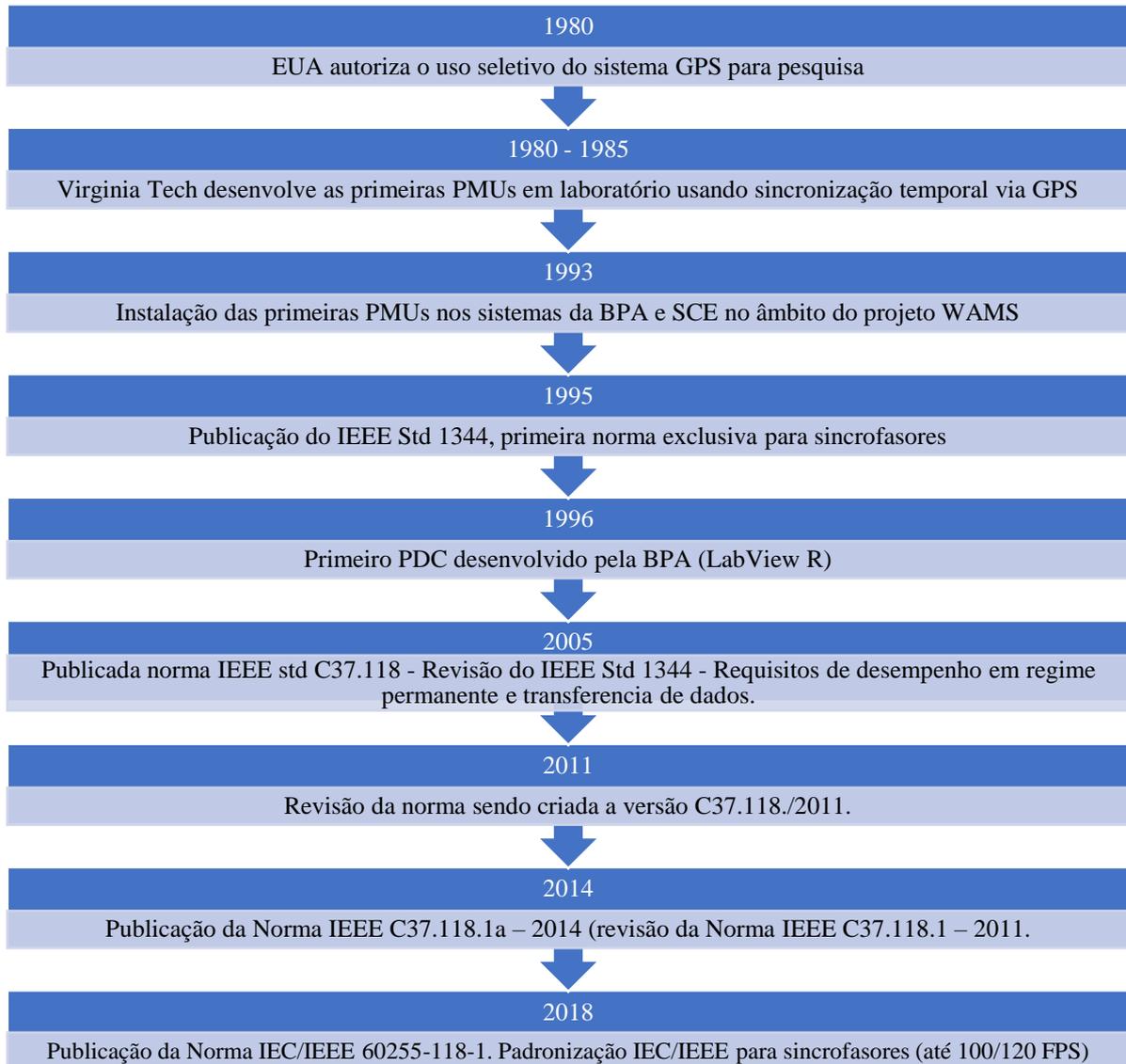


Figura 3 - Evolução no tempo de PMUs e normas associadas

Na próxima seção será realizada uma análise dos principais aspectos referentes as normas que regem as especificações e requisitos das PMUs. Os principais aspectos que viabilizam a utilização da PMU para realização deste trabalho estão contidos nas normas C37.118/2005 [18] e C37.118.1/2011 [19].

2.4.1 Revisão das Normas de Sincrofasores

Conforme linha histórica apresentada na seção 2.3, em 2005 foi elaborada norma C37.118 que pela primeira vez estabeleceu requisitos de desempenho em regime permanente para as PMUs e trouxe uma padronização para o fluxo de dados das PMUs. Em 2011 houve revisão da norma sendo publicada a revisão C37.118.1/2011 onde foram revisados os requisitos em regime permanente para as PMUs e estabelecidos requisitos para o desempenho dinâmico. Adicionalmente a revisão da norma trouxe definição para as PMUs classe P voltadas para aplicações dinâmicas relacionadas a sistemas de proteção e controle e a PMU classe M direcionada para aplicações de monitoramento.

Neste capítulo será apresentado o estudo das normas relacionadas aos sistemas de medição fasorial com foco nos requisitos e aplicações pertinentes ao trabalho desenvolvido. Sendo assim, além de estudar o desempenho em regime permanente das PMUs, será realizado um estudo das definições de fasor da norma, requisitos de sincronismo de tempo e características dos *frames* de dados. Adicionalmente a norma também estabelece requisitos de desempenho dinâmicos para as PMUs e estabelece requisitos de testes para as mesmas, porém estes aspectos não serão abordados neste capítulo.

Sistemas digitais de proteção, controle e medição baseados em computadores ou em equipamentos que utilizam microprocessadores se tornaram recursos comuns em subestações de energia elétrica. Os relés digitais modernos, também conhecidos como Dispositivos Eletrônicos Inteligentes, popularmente também chamados de IED do inglês *Intelligent Electronic Devices* atualmente possuem seu uso disseminado em subestações de energia [14]. Além de agregarem mais recursos para os sistemas de proteção, controle e automação das subestações estes dispositivos se tornaram altamente confiáveis e atualmente todos os novos projetos de subestações utilizam IEDs.

Estes equipamentos usam dados amostrados para calcular grandezas elétricas, como tensão, corrente e seus respectivos fasores. Os fasores são usados em muitas funções de proteção e aquisição de dados, porém sem sincronismo de tempo. Aliando a captura dos fasores a uma base sincronizada de tempo cria-se a oportunidade de ampliar as aplicações possíveis de serem executadas por estes equipamentos possibilitando melhor estudo e conhecimento do sistema onde o recurso esteja aplicado.

Com a evolução tecnológica e a padronização das especificações da PMU, a obtenção de fasores sincronizados no tempo se tornou algo possível. Através do sincronismo com fonte GPS e a precisão dos equipamentos atuais é possível obter dados em diferentes pontos geograficamente distantes entre si com uma estampa de tempo confiável.

Conjuntos de medições simultâneas derivados de fasores sincronizados fornecem um método amplamente aprimorado para rastrear fenômenos dinâmicos do sistema de potência para monitoramento, proteção, operação e controle do sistema de energia.

A título de comparação, conforme será aprofundado mais a frente, uma PMU trabalhando em um sistema de 60Hz, por norma, deve ser capaz de capturar e publicar até 120 amostras/seg. Atualmente conforme o Procedimento de rede 2.12 – “Requisitos mínimos de supervisão e controle para a operação do ONS” [15] “O período de transferência deve ser parametrizável por centro de operação do ONS, devendo os sistemas serem projetados para suportar períodos de aquisição de 4 (quatro) segundos e, em alguns casos, de 6 (seis) segundos, períodos esses definidos de comum acordo entre o agente e o ONS”. Desta forma, além das PMUs permitirem uma taxa de amostragem muito superior ao dos sistemas SCADA os mesmos não possuem requisitos de sincronismo dos dados, não sendo possível garantir que todos os dados foram adquiridos em uma mesmo instante para realizar estudos. A título de exemplificação gráfica o site da SEL - *Schweitzer Engineering Laboratories* [16] apresenta uma comparação entre os tempos de amostra do sistema SCADA x PMU, conforme a Figura 4.

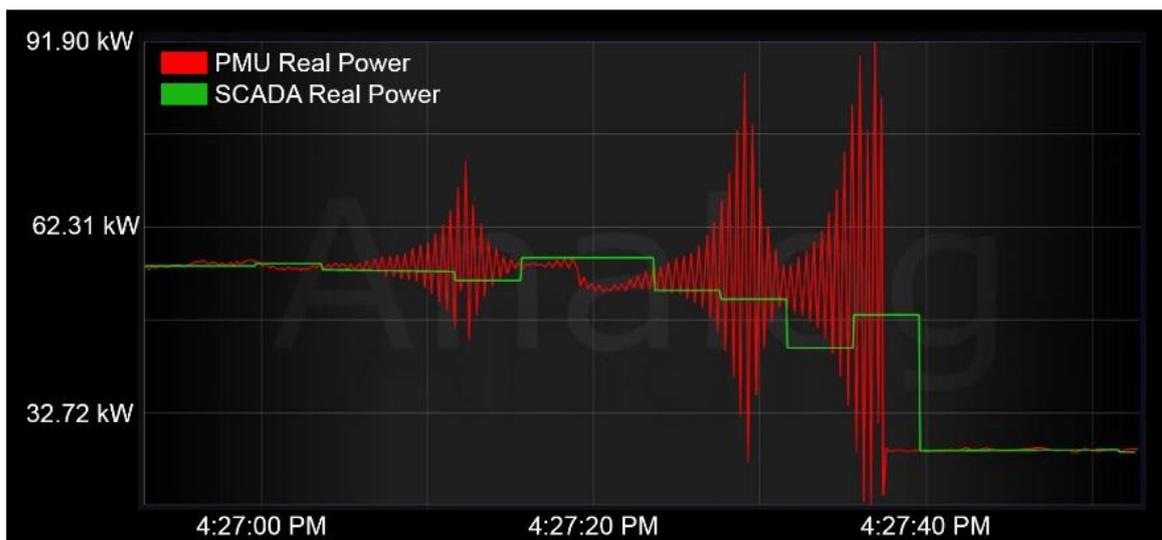


Figura 4 - Comparação dados sistema SCADA vs PMU

Considerando que o ONS no Brasil possui os dados do sistema de supervisão SCADA para mapeamento e determinação do estado do sistema é possível perceber o potencial das aplicações utilizando os dados de PMU. A Tabela 1 apresenta um comparativo da capacidade de observabilidade que é possível obter utilizando sistema SCADA e a PMU.

Tabela 1 - Comparação do sistema SCADA vs PMU

SCADA	PMU
Observabilidade estática do sistema com atualizações dos dados superior a 1 segundo.	Observabilidade dinâmica do sistema. Por norma em um sistema de 60Hz permite envio de dados de 120 amostras por segundo.
Estado do Sistema Estimado a partir de Medições não sincronizadas no tempo;	Permite correlação direta entre as medições em diferentes pontos do sistema sendo uma ferramenta poderosa para análise do sistema.
Distúrbios no sistema podem não ser percebidos devida a taxa de atualização. Atualmente as faltas no sistema são eliminadas em menos de 150ms.	Permite avaliação dinâmica do sistema em condições de falta.

Devida as vantagens apresentadas, na Tabela 1, a utilização do sistema de medição sincrofasorial se torna uma ferramenta importante para realização de avaliação em tempo real e dinâmica de ocorrências permitindo avaliações como apresentado na Tabela 2 [17]:

Tabela 2 -Benefícios das PMUs

<p>Aplicações Básicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aquisição e tratamento de dados fasoriais (PDC) • Visualização da dinâmica em tempo real • Registro sincronizado de dados de perturbações
<p>Aplicações em Monitoramento</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análise de perturbações • Análise de oscilações eletromecânicas • Estimação de estados híbrida • Monitoramento de estabilidade de tensão • Monitoramento do estado de operação de geradores
<p>Aplicações em Controle e Proteção</p> <ul style="list-style-type: none"> • Controle de emergência • Controle para amortecimento de oscilações
<p>Proteções sistêmicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aplicações Especiais • Validação de modelos de simulação • Análise de eventos e de faltas (localização) • Estimação de parâmetros de LTs;

A norma C37.118/2005 [18] fornece as definições de fasor e sincrofasor. O documento também apresenta os conceitos de erro vetorial total, do inglês Total Vector Error (TVE), e a metodologia para realização de testes de conformidade também foram introduzidos nesta norma associados aos conceitos de PMU. O documento também trouxe padronização no formato das mensagens, *frame* de dados, para aprimorar a troca de informações e integrações com outros sistemas e equipamentos de diferentes fabricantes. Um exemplo de importante integração através da padronização dos *frames* de dados está relacionada a integração das PMUs com um concentrador principal capaz de adquirir os dados e através de aplicações realizar análise do sistema.

Com a revisão da norma e publicação da versão C37.118/2011 [19] foram incluídos esclarecimentos adicionais para as definições de fasor sincronizado, associada as PMUs. Adicionalmente, os conceitos de TVE e testes de conformidade foram ampliados. Além disso

foram introduzidos parâmetros e limites para a medição de frequência e medição de taxa de variação da frequência chamada na norma de ROCOF do inglês *Rate of change of Frequency*.

Outro aspecto importante relacionado a PMUs está associado à filtragem de sinais. Os transformadores de medição e instrumentos associados tem por objetivo monitorar os parâmetros do sistema de energia onde estão conectados. Sendo assim, a norma C37.118/2011 também descreve e quantifica o desempenho da unidade de medição fasorial. Além dos parâmetros de magnitude, ângulo de fase, frequência e ROCOF a norma também informa o tratamento dos sinais que podem estar corrompidos por conteúdo harmônico, ruído e mudanças de estado causadas por cargas do sistema e controle e proteção.

A Figura 5 mostra uma visão esquemática dos dados de entrada e saída das PMUs.

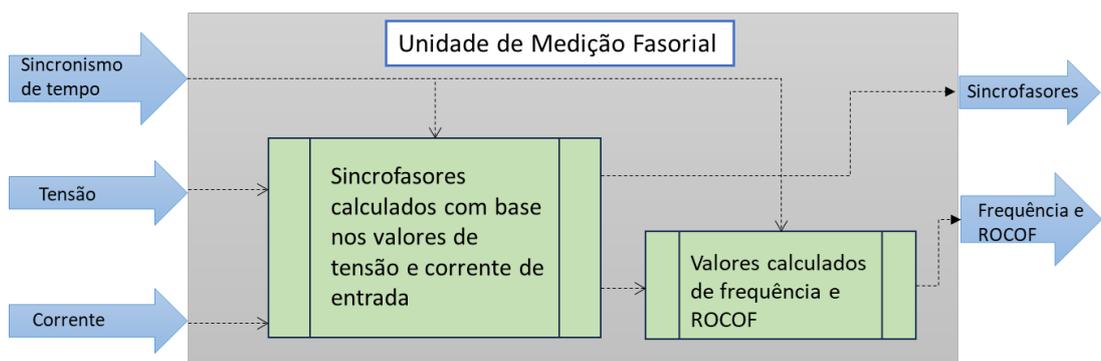


Figura 5 - Visão esquemática dos dados de entrada e saída das PMUs

2.4.1.1 Requisitos de sincronismo de tempo

Uma PMU deve ser capaz de receber referência para sincronismo de tempo de uma fonte confiável e precisa. Atualmente sistemas de relógios referenciados aos satélites GPS podem ser utilizados como fontes de sincronismos para diferentes sistemas utilizados em subestação podendo obter sincronismo com erro inferior a 50ns [21].

Os relógios referenciados a sistemas GPS podem fornecer sincronismo de tempo no padrão UTC com precisão suficiente para manter o erro vetorial total (TVE), erro de frequência (EF) e erro de taxa de mudança de frequência (ROCOF) dentro dos limites exigidos. Uma arquitetura simplificada de sincronismo de tempo de uma PMU é representada através da Figura 6.

Todas as medições devem ser sincronizadas com a hora UTC-0 com precisão suficiente para atender aos requisitos da norma C37.118/2011 [19]. Deve-se observar que um erro de tempo de $1\mu\text{s}$ corresponde a um erro de fase do sincrofasor de 0,022 graus para um sistema de 60Hz. Um erro de fase de 0,57 graus (0,01 radiano) causará por si só 1% de TVE. Isto corresponde a um erro de tempo de $\pm 26\mu\text{s}$ para um sistema de 60Hz. Uma fonte de tempo com erro de frequência de 0,083 MHz em um sistema de 60Hz causará o erro máximo permitido em estado estacionário de 0,005 Hz. A fonte de tempo também deve fornecer uma indicação de rastreabilidade para UTC.

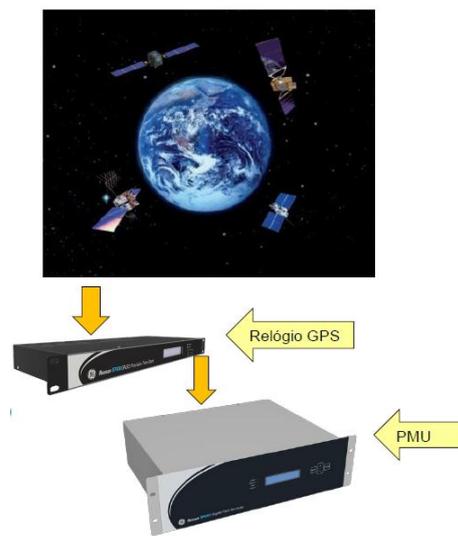


Figura 6 - Arquitetura simplificada PMU - Sincronismo de tempo

Para cada medição, a PMU deverá atribuir uma etiqueta de tempo que inclua o horário de realização da medida e a qualidade da informação no momento de medição. A estampa de qualidade do tempo deve informar a precisão do sincronismo indicando claramente a rastreabilidade para UTC, precisão do relógio GPS e status do segundo bissexto. Em caso de falha de sincronismo a PMU deverá atribuir um sinalizador, bit de erro, a cada medição para indicar precisão dos dados.

2.4.1.2 Avaliação da Medição dos Sincrofasores

Os valores obtidos de uma PMU podem incluir diferenças tanto na amplitude quanto na fase em relação ao sinal senoidal medido. Embora possam ser especificadas separadamente, as diferenças de amplitude e fase são consideradas juntas nesta norma definindo um erro vetorial

total chamado TVE. O TVE expressa a diferença entre uma amostra perfeita de um sincrofasor e a estimativa dada pela unidade em teste no mesmo instante.

O valor é normalizado e expresso por unidade do fasor teórico sendo definido na norma pela equação (26):

$$TVE(n) = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r(n) - X_r(n))^2 + (\hat{X}_i(n) - X_i(n))^2}{(X_r(n))^2 + (X_i(n))^2}} \quad (26)$$

Onde $\hat{X}_r(n)$ e $\hat{X}_i(n)$ são as sequências de estimativas fornecidas pela unidade em teste, e $X_r(n)$ e $X_i(n)$ são as sequências de valores teóricos do sinal de entrada nos instantes de tempo (n) atribuídos pela unidade para esses valores.

As medições dos sincrofasores serão avaliadas utilizando o critério TVE da equação (26). O conceito de TVE é muito importante neste trabalho pois ele também será adicionado aos erros em instrumentos de medição aonde será realizada uma correlação entre os erros de instrumentos e o conceito de TVE.

A Tabela 3 apresenta os principais requisitos de PMU para operação em regime permanente em relação ao cálculo de frequência, tensão e corrente.

As estimativas do sincrofasor, da frequência e do ROCOF devem ser feitas para que possam ser relatadas a uma taxa constante de amostragem (F_s). A taxa F_s é um número inteiro que indica quantas medições serão reportadas por segundo pela PMU.

As medições de todas as grandezas amostradas pela PMU devem ser feitas e relatadas no mesmo período e instante de tempo simplificando o processo de comparação entre sinais adquiridos por PMUs distintas. Na frequência de 60Hz as PMUs devem ser capazes de suportar as seguintes taxas de amostragem, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3 - Requisitos mínimos PMU para desempenho em regime permanente

Sinal	Condição de Referência	Faixa mínima de operação sobre a qual a PMU deve estar dentro do limite determinado de TVE			
		PMU Tipo P		PMU Tipo M	
		Faixa de Operação	TVE Máximo (%)	Faixa de Operação	TVE Máximo
Frequência	Frequência Nominal	$\pm 2,0Hz$	1	$\pm 2,0Hz$ para $F_s < 10$ $\pm \frac{F_s}{5}$ para $10 \leq F_s < 25$ $\pm 5,0 Hz$ para $F_s \geq 25$	1
Tensão (Magnitude)	100% da faixa	80% a 120%	1	10% a 120%	1
Corrente (Magnitude)	100% da faixa	10% a 200%	1	10% a 200%	1
Distorção Harmônica	<0,2% (THD)	1% até harmônico de 50 ordem	1	1% até harmônico de 50 ordem	

Onde F_s é a taxa de amostragem de sincrofasores como por exemplo 60 *frames* por segundo.

Tabela 4 - Taxas de amostragens padronizadas para PMUs

Frequência do sistema	60Hz					
Frames por segundo	10	12	15	20	30	60

2.4.2 Classes de desempenho

A norma C37.118/2011 estabelece duas classes de desempenho para as PMUs que são do tipo proteção, tipo P, e medição, tipo M.

A classe P é planejada para aplicações que requerem menor latência, como aplicações de proteção e controle, com requisitos mais brandos de erro de medição. A classe M é destinada para aplicações que requeiram erros menores de medição permitindo uma latência maior.

É importante destacar que estas duas designações de classe não indicam que qualquer uma das classes seja adequada ou necessária para uma aplicação específica. As classes de

medição também não definem que uma PMU deve ser conectada a um enrolamento específico de medição ou corrente de um instrumento de medição. O usuário da PMU deve escolher uma classe de desempenho que corresponda aos requisitos da aplicação e estudo desejado.

2.4.3 Características técnicas para integração das PMUs ao SIN

Em 2014 através da nota técnica NT 115 – 2014 o ONS estabeleceu as principais características técnicas para as PMUs no Brasil. Posteriormente estes requisitos técnicos foram revisados e incorporados aos procedimentos de rede do ONS, fazendo parte do Submódulo 2.13 [20].

Seguem abaixo os principais requisitos técnicos selecionados no procedimento de rede.

- As PMU devem ser configuradas como PMU de Classe M (medição);
- As PMU devem conter nos pacotes computacionais de sincrofasores as seguintes medições:
 - (a) Medição de tensão, módulo e ângulo das 3 (três) fases de todos os terminais de linha de transmissão indicados pelo ONS e pertencentes à Rede de Operação. A medição de frequência e a taxa de variação de frequência deve se dar para apenas uma das fases, devendo ser escolhida a mesma fase que tem medição na barra da subestação da saída da linha de transmissão monitorada;
 - (b) Medição de módulo e ângulo das 3 (três) fases das correntes de todos os terminais de linha de transmissão indicados pelo ONS e pertencentes à Rede de Operação. Para cálculo dos sincrofasores de corrente, as PMUs devem utilizar os sinais disponibilizados pelos enrolamentos dos transformadores de corrente (TC) do sistema de proteção; e
 - (c) Medição de módulo, ângulo, frequência e taxa de variação de frequência da fase da tensão das seções de barra onde o terminal de linha de transmissão pode se conectar. Para os casos de barramento em anel, não é necessária a medição de tensão dos transformadores de potencial (TP) ligados ao barramento.
- Exatidão da medição: Todas as medições de tensão devem ser efetuadas por equipamentos cuja classe de exatidão garanta uma exatidão mínima de 1% e as medições de corrente devem ter uma exatidão mínima de 10%. Tais exatidões devem englobar toda a cadeia de equipamentos utilizados, tais como TP, TC, transdutores etc.

- As medições devem ser sincronizadas por Sistemas de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System – GNSS*), por exemplo o sistema GPS, e transmitidas a uma taxa de 60 frames por segundo, com selo de tempo no padrão UTC (*Universal Time Coordinate*).

Além destes requisitos as PMUs devem atender todos as prerrogativas prevista na norma C.37.118/2011.

Em 2022 [21] a abrangência de PMUs integradas ao SIN ultrapassou o número de 100 subestações com mais de 400 terminais de LTs monitorados, demonstrando que o uso da tecnologia vem se expandindo no Brasil. No Brasil desde 2017, em novos leilões de transmissão, a implantação de PMU se tornou requisito mínimo obrigatório, previsto em edital, para linhas com classe de tensão igual ou superior a 345kV [22]. A expansão do uso de PMUs no Brasil permite avaliação de novos métodos de otimização de parâmetros de LTs conforme proposto neste trabalho. A Figura 7, apresentada em [21], mostra o número de subestações pertencentes ao SIN com a presença de PMU instalada em pelo menos um terminal de linha de transmissão até 2022.

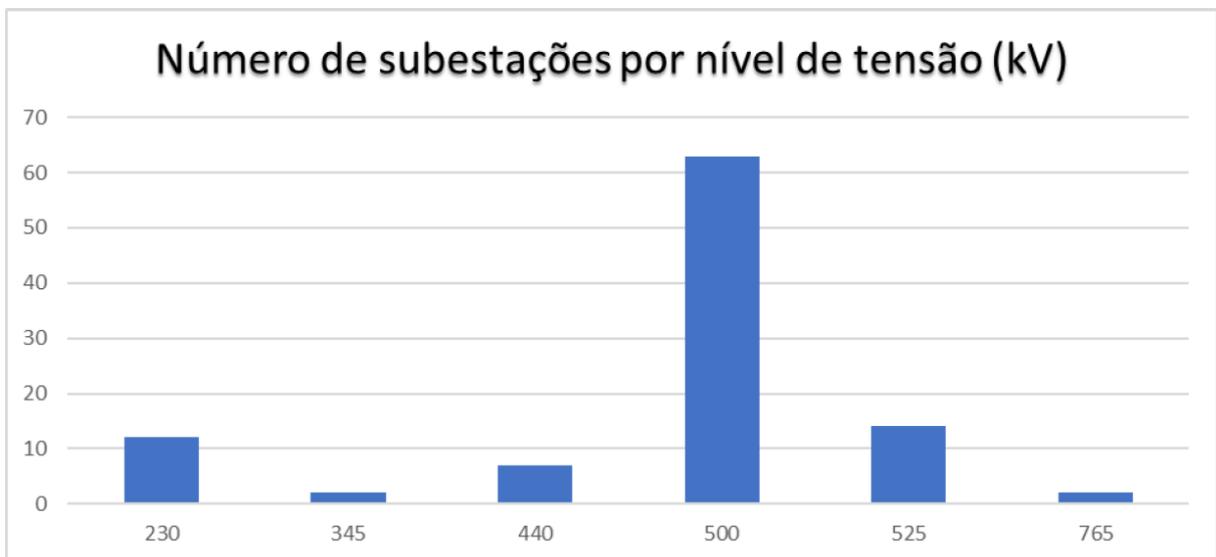


Figura 7 - Expansão das PMUs no Brasil - Dados referentes ao ano de 2022

2.5 Erros de instrumentos de medição

Este trabalho apresenta uma proposta para otimização de parâmetros de LTs utilizando dados de medição reais coletados através de PMU. Neste sentido, os erros de medida se tornam cruciais para a estimação de parâmetros, pois o desempenho do sistema proposto está diretamente associado a qualidade das medidas. Os erros associados às PMUs foram apresentados na seção anterior e nesta seção serão abordados os erros associados aos instrumentos de medição.

Para a realização de qualquer tipo de medição são necessários instrumentos adequados para medir a grandeza desejada. Em um sistema elétrico de potência, devido à presença de altos níveis de tensão e corrente, torna-se necessária a utilização de transformadores capazes de reduzir o nível dessas grandezas para valores seguros a serem medidos sem que seja necessário trabalhar com tensão e corrente que flui pela carga ou com equipamento conectado em tensão nominal. Para um sistema elétrico, utiliza-se o transformador de corrente (TC) e o transformador de potencial (TP) como transformadores de medidas.

Conforme apresentado, as PMUs possuem requisitos específicos que determinam seus limites máximos de erro associados a leitura e ao cálculo de fasores. Porém, devida às características construtivas dos instrumentos de medição, possuem erros associados durante seu processo de transformação das grandezas elétricas. Desta forma, faz-se necessária uma abordagem de como os erros de instrumentos de medição podem impactar no desempenho das PMUs e suas aplicações.

Os transformadores para instrumentos (TI) são projetados e construídos para transferir sinais elétricos para instrumentos de medição, controle e proteção, com as principais funções de isolar a instrumentação dos circuitos de alta tensão e reduzir as tensões e correntes primárias a valores padronizados e que sejam quantitativamente possíveis de medir pela instrumentação conectada aos enrolamentos secundários dos respectivos TIs. No caso dos TPs o uso de transformadores magnéticos é inviável para tensões elevadas, pois seriam necessários núcleos magnéticos de grandes dimensões e peso elevado [23]. A solução empregada faz uso de uma coluna de divisão capacitiva, combinada com um núcleo magnético. Tais transformadores são denominados Transformadores de Potencial Capacitivo (TPC), sendo mais comum sua aplicação para níveis de tensão igual ou superior a 69kV [23]. Os TPs possuem sua tensão secundária normalizada em 115V.

Os transformadores de corrente, na sua forma mais simples, possuem um enrolamento primário, geralmente de poucas espiras, e um secundário, no qual a corrente nominal transformada assume valores normalizados de 1A ou 5A. Desta forma os instrumentos de proteção e medição do sistema elétrico podem ser dimensionados de forma reduzida, compatíveis com os valores de corrente normalizados para secundários dos TC.

A Figura 8 mostra um esquema do uso e conexão típicos destes equipamentos em um sistema elétrico.

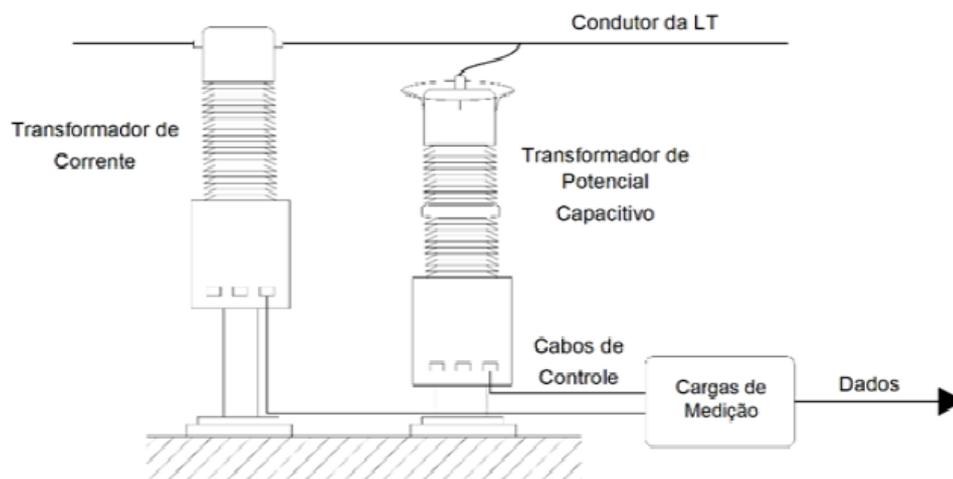


Figura 8 - Esquema de conexão típico de TC e TP no sistema elétrico

Os erros presentes nos transformadores para instrumentos podem ser de duas naturezas [24]:

- Erro de relação de transformação que é o erro associado a leitura da tensão ou corrente secundária medida, que não corresponde exatamente ao produto da tensão ou corrente primária pela relação de transformação nominal;
- Erro de ângulo de fase que é o ângulo que mede a defasagem entre a tensão ou corrente fasorial primária e a secundária.

Os TCs possuem classe de exatidão, que englobam os dois tipos de erros, sendo especificados dependendo da aplicação. Para medição podem ser utilizados os TCs com exatidão de 0,3%; 0,6% ou 1,2%. Para utilização em sistemas de proteção, podem ser empregados os TCs com classe de exatidão de 2,5%; 5% ou 10%.

Os TPs podem apresentar classe de exatidão de 0,1%; 0,3%; 0,6% e 1,2%, que englobam os dois tipos de erros presentes nos TPs. Os TPs com classe de exatidão de 0,1% são utilizados para fins de calibração de equipamentos em laboratório. Os TPs com classe de exatidão de 0,3% são indicados para medição de grandezas para fins de faturamento. Por fim, os TPs com classe de 0,6% ou 1,2% são aplicados em sistemas de medição sem fins de faturamento. Já os transformadores de potencial com exatidão de 3% são utilizados em sistemas de proteção.

Os aspectos destes erros dos TCs e TPs e o impacto para o sistema de medição sincrofasorial é o objeto de análise e será abordado de forma mais ampla na subsecção 2.5.1.

2.5.1 Erros em transformadores de corrente

Nos TCs a corrente secundária deve retratar o mais fielmente possível, tanto em módulo quanto em ângulo, a corrente primária do circuito ao qual está conectado. Estes erros podem influenciar diretamente os resultados obtidos de um sistema de sincrofasores. O erro de relação e o erro de ângulo de fase, nos TCs, podem ser definidos pela equação (27).

Erro de relação percentual

$$\varepsilon\% = \frac{(RTC \cdot I_S) - I_{PN}}{I_{PN}} \cdot 100 \quad (27)$$

Onde:

RTC é a relação de transformação nominal do transformador de corrente.

I_S : Valor eficaz da corrente medida no secundário do TC;

I_{PN} : Valor eficaz verdadeiro da corrente primária, na condição especificada, obtida do diagrama fasorial.

Dada esta definição, pode-se observar que o $\varepsilon\%$ pode assumir valores positivos ou negativos.

Erro de ângulo de fase

Seja β o ângulo de defasagem, geralmente dado em minutos, entre a corrente primária e secundária. O valor β pode assumir valores negativos ou positivos dependendo se a corrente secundária estiver adiantada ou atrasada com relação ao valor primário. Para entender melhor como os erros de fase ocorrem será analisado o circuito equivalente de um transformador real, conforme Figura 9.

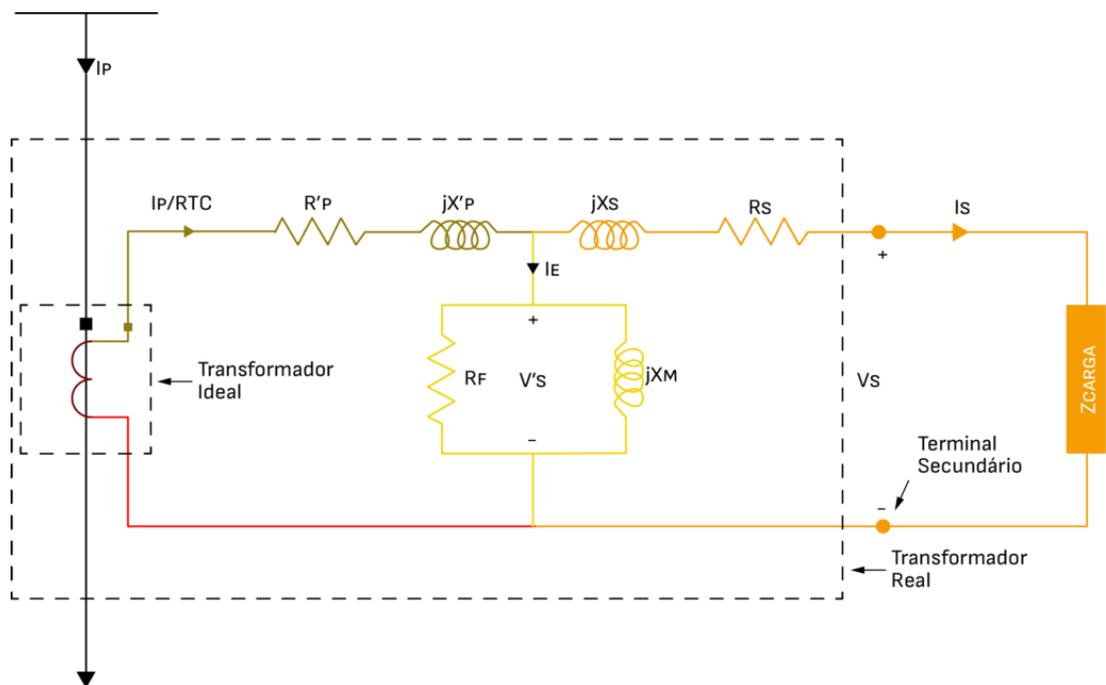


Figura 9 -Circuito equivalente de um transformador de corrente

Onde:

R'_p : Resistência do enrolamento primário refletida no secundário;

R_S : Resistência do enrolamento secundário;

jX'_p : Reatância de dispersão do enrolamento primário refletida no secundário;

jX_S : Reatância de dispersão do enrolamento secundário;

R_F : Resistência de perdas no ferro;

jX_m : Reatância de magnetização;

I_p : Corrente no enrolamento primário;

I_S : Corrente no enrolamento secundário;

V_S : Tensão nos terminais secundários do transformador;

I_E : Corrente de excitação;

Como pode ser observado na Figura 9, parte da corrente primária é necessária para magnetização do núcleo. Adicionalmente é possível identificar que ocorrem perdas no transformador por conta da resistência dos enrolamentos primários e secundários. Sendo assim a corrente necessária para alimentar a carga secundária não reflete, exatamente, em módulo e ângulo, a corrente primária, produzindo os erros de relação e ângulo de fase do TC. Desta forma é possível perceber que variações na corrente e características da carga podem impactar nos erros do TC.

Este trabalho não tem por objetivo aprofundar na teoria de erros de instrumentos de medição, porém na sequência será realizada uma avaliação buscando compreender como os erros de medição podem impactar no desempenho das PMUs e conseqüentemente a estimação de parâmetros de LTs, objeto principal deste trabalho.

Conforme norma Brasileira ABNT, NBR 6856/2021 [25] para TCs de medição, a classe de exatidão abrange a faixa entre 10% e 100% da corrente nominal, enquanto que para TCs de proteção, a classe de exatidão abrange a faixa a partir da corrente nominal até 20 vezes a referida corrente nominal. Existe a possibilidade de se instalar PMU em enrolamentos e núcleos de proteção, porém, dependendo da aplicação pretendida e até mesmo para se comparar e avaliar aspectos de exatidão, a utilização em núcleos de medição operacional deve também ser experimentada como uma alternativa nos estudos. Porém, como abordado anteriormente, no Brasil atendendo os Procedimentos de Rede, as PMUs devem estar conectadas nos enrolamentos de proteção. Desta forma, esta seção irá focar nas análises dos impactos dos erros voltados para proteção na aplicação deste trabalho.

O trabalho [24] apresenta uma avaliação das classes de erro de TC, tanto medição como proteção, e realiza um comparativo com os limites de erro estabelecidos para PMU. As análises se limitam ao regime permanente e para os enrolamentos de proteção. No referido trabalho, o autor apresenta que os aspectos normativos dos TCs não guardam uma correspondência efetiva com a definição de TVE das unidades de medição fasorial e a definição de erro estabelecida para transformadores de corrente. Neste sentido, foi desenvolvida no referido trabalho uma expressão para o TVE de transformadores para instrumentos, com base nos seus erros de amplitude e de ângulo de fase, sendo demonstrado que a mesma é distinta da expressão atualmente utilizada para expressar e avaliar a classe de exatidão de um transformador de corrente de medição. A expressão desenvolvida no trabalho [24] é apresentada em (28).

$$TVE (\%) = \sqrt{\left[\left(1 + \frac{\varepsilon\%}{100}\right) \cdot \cos(\beta) - 1\right]^2 + \left[\left(1 + \frac{\varepsilon\%}{100}\right) \cdot \sin(\beta) - 1\right]^2} \cdot 100 \quad (28)$$

Onde: $\varepsilon\%$ é o erro de relação e β é o erro de ângulo de fase.

Esta condição indica que, por exemplo, um TC de medição de classe de exatidão 0,3 não apresenta este mesmo índice quando se trata de exatidão de medição fasorial, pois o erro total vetorial pode alcançar valor próximo a 1%, que já é equivalente ao limite normalizado da unidade de medição fasorial.

De modo similar foi constatado que o conceito de TVE apresentado na norma de PMU se equivale ao conceito de erro composto apresentado nas normas dos TCs de proteção se considerarmos sinais senoidais nas correntes dos referidos TCs. Essa correlação foi buscada de modo avaliar melhor, com um mesmo índice de exatidão, o efeito dos erros dos TCs de proteção na medição fasorial.

No que se refere às normas vigentes específicas de cada equipamento, os TCs de medição e proteção apresentaram desempenho satisfatório para as classes de exatidão especificadas, com grau de confiabilidade elevado e limites inferiores aos permitidos, para as aplicações tradicionais de medição e proteção.

2.5.2 Erros em Transformadores de Potencial Capacitivo

Os TPs, diferente dos TCs, operam em faixas mais estreitas de valores de tensão, normalmente de 90% a 110% da tensão nominal. Desta forma, em regime permanente, o TPC não está sujeito a operar em uma faixa de trabalho distante do seu valor nominal permitindo delimitar melhor sua zona de operação.

Por outro lado, por apresentar elementos armazenadores de energia, a tensão secundária apresentará distorções nos seus valores, quando fora da frequência nominal e em regime transitório. Além disto, também podem apresentar o fenômeno de ferrossonância em determinadas frequências [23].

O TPC compreende basicamente em um divisor capacitivo e um transformador de potencial indutivo projetados e interligados de tal forma que a tensão secundária da unidade eletromagnética é substancialmente proporcional em módulo e em fase com a tensão primária aplicada à unidade divisora capacitiva [26].

A tensão secundária de um TPC reflete a tensão primária reduzida com relação definida durante operação em regime permanente. O sinal de saída do TPC não é mais uma réplica da tensão primária durante as condições transitórias do sistema devido à presença de elementos de armazenamento de energia no TPC porém, para este trabalho, esta condição não se torna um fator limitador pois o foco está no regime permanente.

Os principais componentes do TPC estão apresentados na Figura 10.

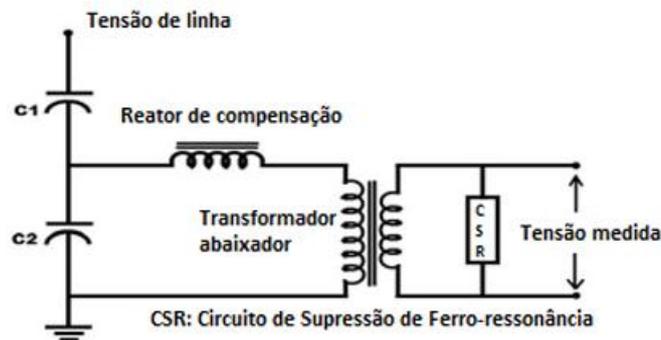


Figura 10 - Modelo básico de um TPC

Onde:

- Coluna capacitiva de pilha que funciona como um divisor de tensão para reduzir a tensão da linha para uma tensão intermediária;
- Reator de sintonia (compensação) para compensar a reatância da capacitância da pilha para evitar mudança de fase entre as tensões primária e secundária na frequência de operação do sistema;
- Transformador abaixador para reduzir ainda mais a tensão intermediária para um nível mais baixo que é a fonte de tensão para os relés e outros equipamentos;
- Circuito de supressão de ferorrressonância para mitigar as oscilações de ferorrressonância;

O artigo [23] apresenta erros de TVE com base em simulações realizadas através da modelagem de TPs. Neste trabalho os autores realizam a modelagem de três TPCs que são TPC Alstom CCV525 (9)1, TPC GE CD-31B e TPC Genérico CVT245/8M. A modelagem foi feita através de rotina implantada no MATLAB onde foram realizadas simulações de erro na frequência nominal em 60Hz e análises de erros em frequência fora da nominal. A simulação dos erros em regime permanente foi modelada pela aplicação do teorema de Thévenin no circuito equivalente com objetivo de verificar o valor de tensão entregue no secundário do TP. O artigo [23] utilizou a mesma equação (28), apresentada neste trabalho aplicada para os TCs

para cálculo do TVE dos TPs. Os resultados das simulações realizados pelo autor em [23] estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Erros estimados para o TPC - Simulação

Erros TPCs			
	Erro de relação	Desvio Angular	TVE
TPC (1)	-0,38%	0,17	0,48%
TPC (2)	0,06%	0,30	0,53%
TPC (3)	-2,05%	-0,41	2,17%

Nos aspectos normativos dos TCs e TPs foi verificado que os mesmos não guardam uma correspondência direta com a definição de exatidão das unidades de medição fasorial. Neste sentido os trabalhos [23] e [24] desenvolveram correlação dos índices que avaliam os erros de medição dos transformadores de instrumentos com a definição de TVE da PMU para que se pudesse gerar uma equivalência entre os erros.

Foi constatado que é possível realizar equivalência do conceito de TVE, apresentado na norma C37.118/2011, ao conceito de erro composto apresentado na norma dos TCs de proteção considerando sinais senoidais. Essa correlação foi estudada para criar equivalência entre os conceitos de erro e permitir comparação utilizando um mesmo conceito como referência. O mesmo conceito de TVE foi aplicado para TPs sendo realizadas simulações para avaliar os erros associados aos instrumentos de medição.

Até o presente momento não existe descrito nas normas requisitos para TCs e TPs que correlacionem ou descrevam aplicações destes equipamentos para uso específico com PMU ou que apresente correlação direta entre os erros destes equipamentos com o TVE especificado para as PMUs. Os erros dos TIs irão impactar nos resultados apresentados na PMU e nesta seção buscou-se realizar uma correlação entre os conceitos, pois os erros de medição se relacionam com os erros apresentados pela PMU sendo esta relação relevante para o desenvolvimento deste trabalho.

2.6 Otimizador por algoritmo genético

2.6.1 Conceitos de otimização

Segundo [27] a otimização é uma ferramenta importante para tomada de decisão e análise de problemas. Para utilizar as ferramentas de otimização há necessidade de identificar qual objetivo ou desempenho desejado para o sistema. O objetivo depende de características dos sistemas que são as variáveis do projeto ou variáveis de decisão sendo que estas variáveis devem obedecer às restrições e limites que são impostos ao sistema ou pelo sistema estudado.

O processo de identificação dos objetivos, variáveis e restrições é denominado modelagem do processo. Realizar modelagem adequada é fundamental para o processo de otimização e, dependendo da complexidade do modelo, é possível que haja dificuldade e esforço computacional para obtenção da solução ou melhor resultado para o problema.

Após formulação do modelo o algoritmo de otimização é utilizado para obter a melhor solução ou os melhores resultados, dentro dos limites estabelecidos. Para o processo de otimização não existe um algoritmo universal, mas um conjunto de métodos de otimização que devem ser aplicados conforme necessidades do usuário e características do problema. Basicamente os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser determinísticos ou estocásticos.

Um modelo determinístico é caracterizado quando há um conjunto conhecido de entradas e do qual resultará um único conjunto de saídas. De maneira geral os métodos determinísticos possuem a vantagem de necessitar de baixo esforço computacional e geralmente dependem de um baixo número de iterações em torno da função objetivo para convergência. Por sua vez, um modelo estocástico possui uma ou mais variáveis aleatórias como entrada. Entradas aleatórias conduzem a saídas aleatórias. As saídas aleatórias são consideradas estimativas das verdadeiras características do sistema e capazes de produzir soluções que otimizam o desempenho do modelo.

Nesta seção serão abordados os algoritmos de computação evolucionária, que pertencem a uma família de métodos estocásticos de otimização conhecido como Algoritmos Evolucionários (*AE*).

2.6.2 Algoritmos Evolutivos

Algoritmos Evolutivos (AEs) são técnicas de otimização estocásticas comumente utilizadas para resolução de problemas de otimização difíceis de serem resolvidos por métodos determinísticos [28].

Os AEs têm sua origem através da observação nas técnicas de sobrevivência e evolução das espécies [28]. Podem-se citar como exemplos os algoritmos baseados nos processos de colônias de formigas (“*Ant Colony Optimization*”) [29] e no vôo dos pássaros (“*Particle swarm optimization*”) [30].

Os algoritmos estocásticos, como é o caso dos evolucionários, utilizam procedimentos probabilísticos para guiar a pesquisa ou busca da solução para as regiões onde se encontram as soluções ótimas para o problema. Em particular, os algoritmos evolucionários apresentam as seguintes características [31]:

- Eficiência em encontrar as regiões ótimas;
- Flexibilidade para se adaptar a diferentes problemas;
- Independência do uso de derivadas (das funções as quais se deseja otimizar);
- Possibilidade de se encontrar diversos pontos ótimos em uma única execução.

Os algoritmos evolucionários tentam reproduzir artificialmente algum processo natural. Contudo, o termo “evolucionário” é usado de maneira mais ampla e é aplicado aos métodos que desenvolvem soluções nas quais os melhores indivíduos têm maiores probabilidades de serem selecionados.

Os parâmetros de entrada dos algoritmos evolucionários variam para todo tipo de algoritmo, mas sempre têm relação com os detalhes da formação da população e com operadores evolucionários. A Figura 11 mostra estrutura típica de um algoritmo evolucionário onde há presença dos seguintes elementos:

1. Etapa inicial corresponde à criação da população inicial, na maioria das vezes, de forma aleatória.
2. Segunda etapa referente ao processo de avaliação dos indivíduos da população aonde se aplicam os operadores genéticos de seleção de indivíduos, cruzamento e mutação. Esta etapa é representada pelo laço 2 a 6 da Figura 11;
3. Terceira etapa: Retorna a melhor solução dentre todos os indivíduos da última geração;

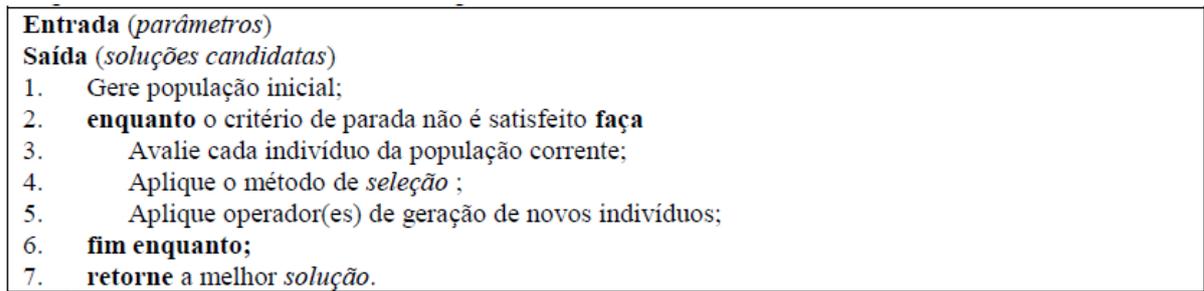


Figura 11 - Estrutura básica dos algoritmos evolucionários

2.6.3 Algoritmo Genético

Dentre as diversas técnicas de algoritmos evolutivos, neste trabalho utilizou-se os Algoritmos Genéticos (AGs).

Os AGs fazem parte da família de algoritmos evolutivos onde os operadores destes métodos realizam uma seleção de uma população criada de forma aleatória ao longo de diferentes gerações até que os indivíduos obtidos estejam o mais próximo possível da solução desejada. Os AGs permitem boa flexibilidade na modelagem para problemas acadêmicos, tais como otimização de modelos econômicos, simulação de sistemas imunológicos, determinação de topologia ótima de redes elétricas, entre outros [8].

A lógica de funcionamento de um algoritmo genético consiste, geralmente, em gerar um conjunto aleatório de soluções de um problema e aplicar operadores que realizam o refinamento destas soluções ao longo de diversas gerações até que os indivíduos obtidos estejam bem próximos ao resultado ótimo/esperado.

Os AGs são métodos de busca e otimização que, em sua origem, foram baseados nos fundamentos da genética. A versão comumente implementada de um algoritmo genético é a *Simple Genetic Algorithm*, na qual a população de indivíduos possui tamanho fixo e os indivíduos são codificados em uma cadeia (*string*) binária [28]. A Figura 12 apresenta um fluxograma que sintetiza o funcionamento deste tipo de algoritmo.

Neste modelo de algoritmo inicialmente é criada uma população inicial que pode ser aleatória ou gerada a partir de critérios específicos para o problema. Cada indivíduo é formado por variáveis que compõe uma possível solução do problema. O espaço de busca é definido como o domínio de cada uma das variáveis que compõe a solução.

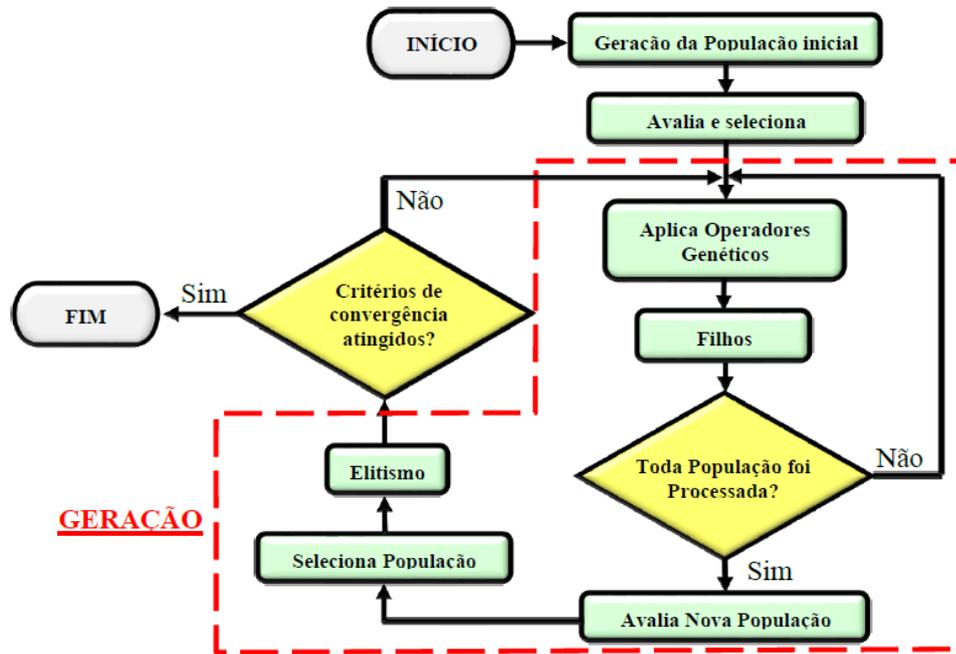


Figura 12 - Simple Genetic Algorithm - Fluxograma Sintetizado

Cada indivíduo da população é avaliado segundo uma função de adequabilidade denominada de função objetivo. Esta função atribui uma nota que determina a aptidão de uma solução em relação às outras da população e permite a classificação dos indivíduos.

Inicia-se então o processo de refinamento das características dos indivíduos ao longo das gerações. Os indivíduos selecionados na etapa anterior são submetidos a modificações nas suas características, conforme critérios pré-estabelecidos, de forma a otimizar ainda mais os resultados.

Esta estratégia permite manter os melhores indivíduos que são aqueles com as melhores aptidões e que mais se aproximam da solução do problema. Na próxima geração de indivíduos são geradas novas mutações com objetivo de otimizar e melhorar ainda mais a solução do problema até que o critério de parada seja alcançado. Podendo este critério estar associado a um determinado grau de avaliação a ser alcançado ou relacionado ao número de iterações do processo. Após atingir o critério de parada, a solução escolhida é a que recebeu o melhor grau de avaliação.

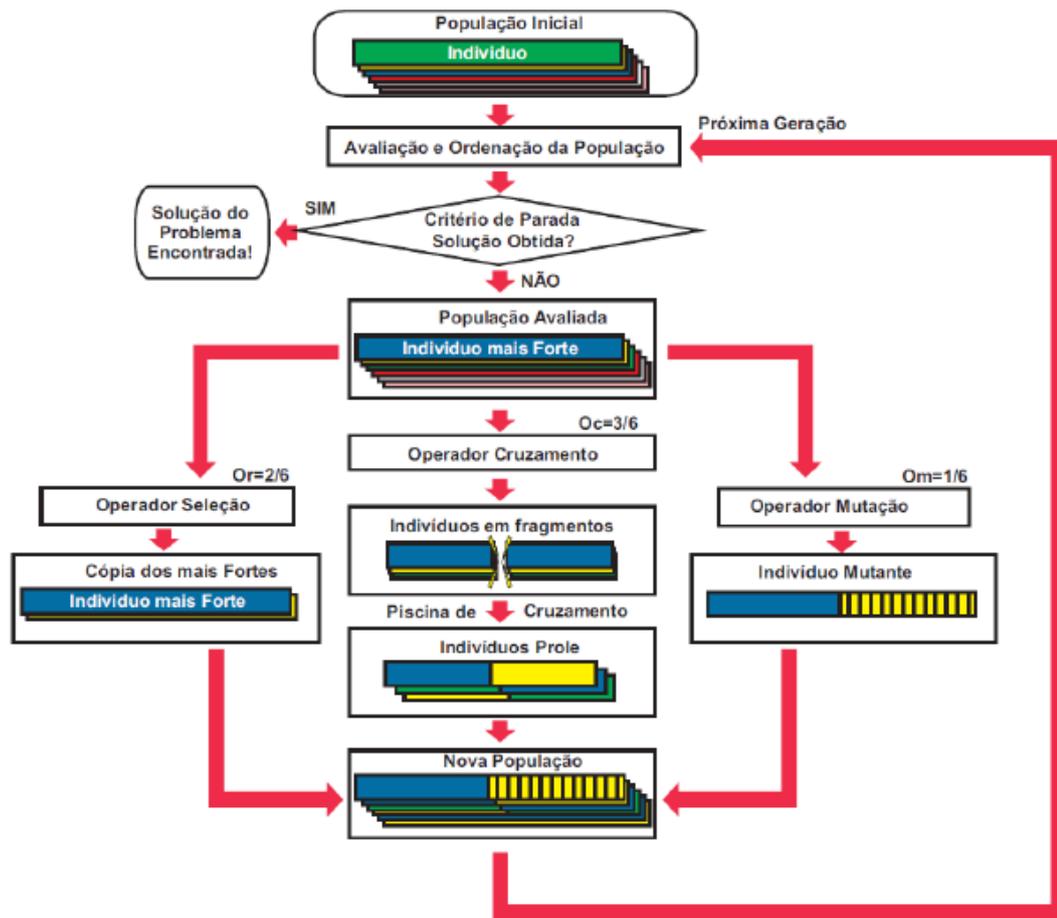


Figura 13 -Estrutura Algoritmo Genético

2.7 Considerações Finais

O desenvolvimento de novas tecnologias permite avaliar e desenvolver novos métodos de determinação e otimização de parâmetros de LTs de forma a obter parâmetros mais próximos do modelo real da LT em estudo.

Com o desenvolvimento e a disseminação do uso das PMUs nos sistemas elétricos é possível obter medições fasoriais no sistema elétrico de potência sincronizadas no tempo. Conforme apresentado neste capítulo, as PMUs possuem requisitos de erro e de sincronismo que permitem a comparação entre os dados de equipamentos localizadas geograficamente distantes entre si possibilitando a realização de diferentes estudos.

Para leitura das grandezas elétricas há necessidade do uso de instrumentos de medição que, por sua vez, possuem erros associados. Atualmente não há norma para TCs e TPs que estabeleçam requisitos de erros específicos para uso destes instrumentos com as PMUs. Sendo

assim, foi apresentada uma correlação entre os erros nos instrumentos de medição e o conceito de TVE, utilizado nas PMUs, para melhor compreensão da correlação entre os erros e como estes podem impactar nos dados fornecidos pelas PMUs.

Finalmente, neste capítulo são apresentados conceitos de otimização com foco em algoritmo genético. Na busca de uma solução para otimização de parâmetros de LTs a utilização de AGs se apresentou como uma ferramenta na busca de indivíduos mais fortes que melhor modelam o sistema em estudo.

3 Algoritmos e Aplicação Proposta

3.1 Considerações iniciais

Conforme abordado no capítulo 1, os métodos tradicionais de determinação de parâmetros de linha de transmissão baseados na geometria da LT apresentam aproximações que inserem erros nesses parâmetros. Com o desenvolvimento tecnológico, novas oportunidades de estimação de parâmetros de LT podem ser estudadas.

Os conceitos apresentados sobre cálculo de parâmetros de LTs, PMU e algoritmo genético, apresentados no capítulo 2, serão utilizados na metodologia proposta neste trabalho para otimização da estimação de parâmetros de LTs. Neste capítulo será apresentada toda a metodologia proposta, inicialmente através da visão geral, seguida do detalhamento de cada etapa do processo de otimização e estimação dos parâmetros.

Na sequência será apresentada a aplicação da metodologia tomando como base um sistema real de PMU em uma linha de transmissão pertencente ao SIN.

3.2 Metodologia Proposta

3.2.1 Visão Geral

Conforme exposto nos capítulos 1 e 2, com o advento de novas tecnologias, dentre elas a PMU, é possível o desenvolvimento e estudo de novas metodologias de trabalho para otimizar a estimação dos parâmetros de uma linha de transmissão, bem como avaliar possíveis variações nesses parâmetros ao longo do tempo. Na seção 2.3 foi mostrado o modelo teórico de uma linha de transmissão capaz de relacionar as grandezas de tensão e corrente em cada terminal através de um quadripolo. Essa relação respeita a equação (21), na qual as matrizes de impedância e admitância da LT, necessárias para a obtenção do quadripolo, são fundamentais para garantir a correspondência das grandezas elétricas entre cada terminal.

A premissa básica da proposta deste trabalho consiste em considerar que a equação (21) estará correta quando quadripolo representar de forma fiel o modelo da LT. Conseqüentemente, erros entre valores medidos na LT e calculados por (21) sinalizarão o quanto o quadripolo utilizado não representa o modelo da LT.

Através das PMUs é possível obter medições sincronizadas no tempo dos sinais trifásicos dos fasores de tensão e corrente nos terminais da LT geograficamente distantes entre si. Sendo assim, com uso de dados de PMU, é proposto neste trabalho a otimização das matrizes Z e Y da LT, necessárias para o quadripolo, de forma obter a melhor solução que atenda a igualdade apresentada na equação (21). Para melhor compreensão da metodologia proposta a equação (21) será reescrita conforme apresentado em (29).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{Spmu} \\ \dot{I}_{Spmu} \end{bmatrix} = [QUADRIPOLO] \begin{bmatrix} \dot{V}_{Rpmu} \\ \dot{I}_{Rpmu} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Buscando solução para o problema, propõe-se utilizar as grandezas elétricas medidas através das PMUs (\dot{V}_{Spmu} , \dot{I}_{Spmu} , \dot{V}_{Rpmu} e \dot{I}_{Rpmu}) para obter o modelo de linha de transmissão que mais se aproxima da solução de (29). Além dos sinais medidos nas PMUs, é necessário ajustar os parâmetros geométricos da LT de forma a estimar as matrizes de impedância e admitância e, conseqüentemente, o quadripolo. Entretanto, a quantidade e complexidade das possíveis variações de Z e Y não viabilizam soluções analíticas para o problema. O caminho encontrado para viabilizar a solução eficiente desse problema foi através de soluções numéricas, especificamente otimização por algoritmo genético.

As matrizes Z e Y tem suas estruturas representadas através das equações (30) e (31).

$$Z = \begin{bmatrix} A + iB & C + iD & E + iF \\ C + iD & G + iH & I + iJ \\ E + iF & I + iJ & K + iL \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$Y = \begin{bmatrix} iM & iN & iO \\ iN & iP & iQ \\ iO & iQ & iR \end{bmatrix} \quad (31)$$

Desta forma a solução proposta para o problema apresentado se baseia, utilizando dados de PMU e algoritmo genético, na realização de variações nas matrizes Z e Y de forma obter o menor erro na igualdade apresentada em (29). O fluxograma apresentado na Figura 14 mostra a metodologia aplicada para solução do problema apresentado.

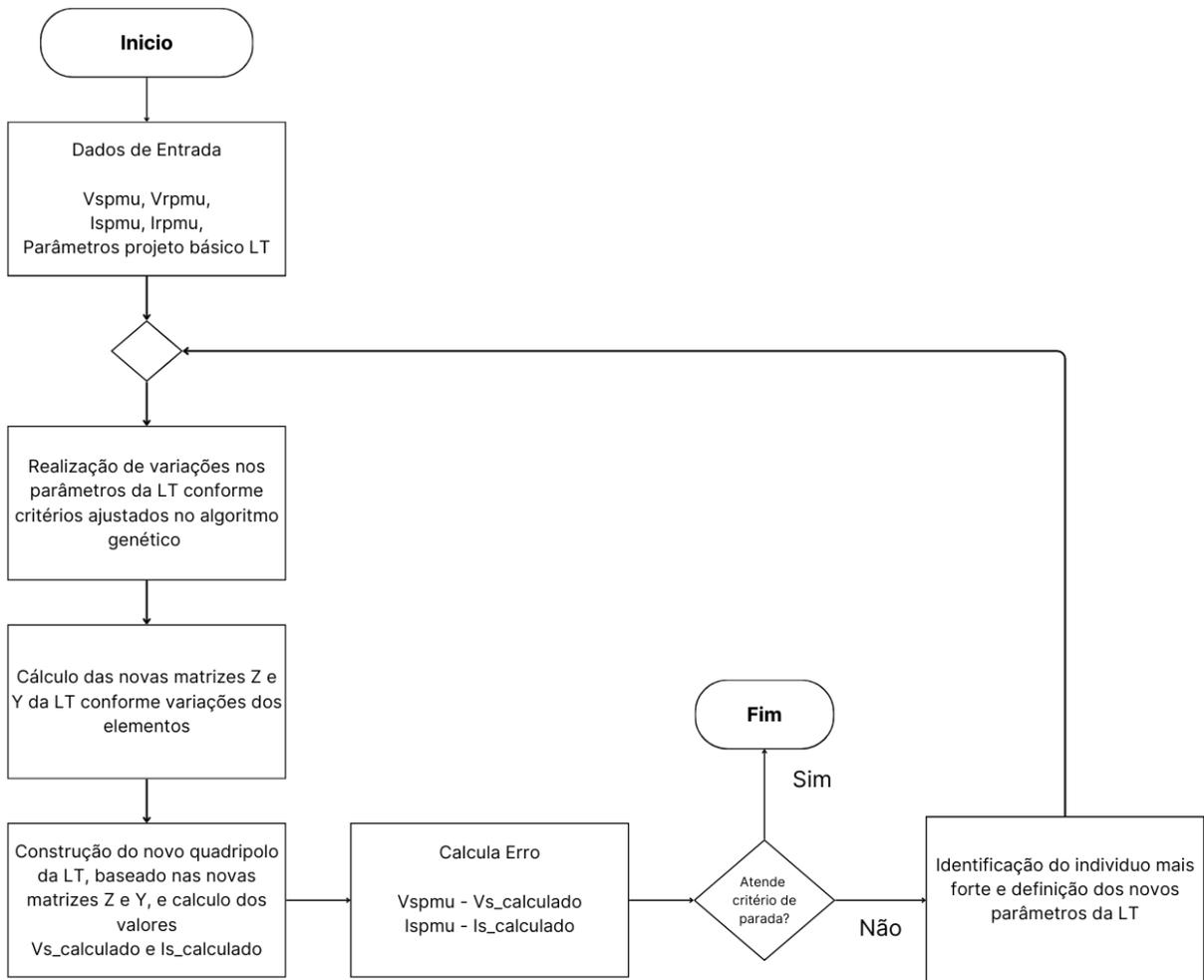


Figura 14 - Algoritmo aplicado para otimização de parâmetro de LT

3.2.2 Definição da estrutura do indivíduo no AG

A parametrização do sistema com as matrizes Z e Y teóricas do projeto básico da linha de transmissão é o ponto de partida do algoritmo desenvolvido. Utiliza-se as informações de projeto para se obter o quadripolo inicial. Os elementos das matrizes Z e Y são obtidos conforme apresentado nas equações (9-11).

Caso os valores dos parâmetros geométricos de projeto da LT fossem exatamente os valores reais após construção e durante a operação, supõem-se que as diferenças entre os valores calculados e medidos dos sinais de tensão e corrente nos terminais da LT fossem nulas. Entretanto, sabe-se que tais parâmetros sofrem alterações por motivos diversos. Alterações permanentes causadas por características construtivas diferentes do projeto ou variáveis no tempo associadas, por exemplo, ao carregamento da linha e condições climáticas.

Através do uso de algoritmo genético realiza-se variações nas matrizes Z e Y da LT com objetivo de buscar uma solução ótima para o problema e aproximar os parâmetros aos valores

reais. O algoritmo genético atua selecionando os conjuntos de indivíduos com o melhor resultado na solução do problema, conforme função objetivo definida. Os indivíduos com melhores resultados vão sendo selecionados e naturalmente o algoritmo evolui para otimizar a solução do problema.

A estrutura do indivíduo a ser criada para solução do problema possuiria o seguinte formato apresentado em (32), composto por 18 variáveis. Os elementos dos indivíduos apresentados seriam os mesmos que compõem as matrizes Z e Y apresentadas nas equações (30) e (31).

$$\text{Individuo conceitual} = [A B C D E F G H I J K L M N O P Q R] \quad (32)$$

Entretanto, o número de variáveis seria muito grande e o processo de cruzamento e mutação poderiam criar indivíduos com valores matemáticos totalmente desconexos aos fenômenos físicos do modelo de LT. Conseqüentemente, acarretando num processo de otimização ineficiente.

Buscando sanar essa ineficiência, o algoritmo desenvolvido utiliza método de cálculo e entrada de dados semelhantes ao aplicado no ATP (*Alternate Transient Program*) para calcular os parâmetros da linha de transmissão através do modelo Bergeron [34]. O anexo A1 apresenta o código implementado do modelo Bergeron desenvolvido em MATLAB. Isso permitiu menor quantidade de variáveis na composição da estrutura do indivíduo e garantiu matrizes Z e Y durante a busca sempre com valores com algum significado físico.

Para realizar os cálculos dos parâmetros das LTs foram considerados os seguintes dados de entrada, conforme Tabela 4:

Tabela 4 - Dados de entrada para cálculo dos parâmetros de LT

Tipo de condutor	Altura do vão médio
Raio interno	Separação entre condutores
Raio externo	Resistividade do solo
Resistência do condutor	Comprimento da LT
Posição dos condutores considerando a estrutura típica;	Número de condutores no feixe

Caso todos os parâmetros geométricos da LT fossem considerados, a estrutura do indivíduo reduziria de 18 para 10 variáveis. Considerando ainda muitas variáveis para serem avaliadas durante o processo de otimização e sabendo que alguns desses parâmetros geométricos podem não sofrer alterações, outro esforço foi realizado para tentar identificar quais parâmetros poderiam ser desconsiderados do processo de otimização por algoritmo genético, deixando-o mais eficiente e rápido.

Para a realização das variações dos indivíduos para o cálculo dos parâmetros otimizados alguns dados característicos da LT foram considerados constantes e em outros foram permitidas variações. A Tabela 5 apresenta as premissas adotadas para a variação dos parâmetros.

Tabela 5 - Análise dos parâmetros de LT

Considerado como:	Características da LT	Justificativa
Constante	Tipo de condutor;	Não é comum ao longo de uma linha de transmissão ocorrer mudança no tipo do cabo condutor ao longo de sua extensão. Dilatação radial do condutor devido à variação na temperatura do condutor seja pela temperatura ambiente ou por carregamento do condutor são irrisórias. Desta forma os dados referentes ao tipo de condutor, raio interno e raio externo foram considerados constantes neste trabalho e não sofrerão variações ao longo das simulações.
	Raio interno;	
	Raio externo	
	Número de condutores no feixe	O número de condutores por fase é determinado conforme critérios de estudo do projeto básico de forma a atender as características de capacidade de carga da linha bem como reduzir as perdas por efeito corona e efeitos de rádio interferência. Este parâmetro também será considerado constante no desenvolvimento deste trabalho.
	Posição dos condutores	Ao longo de uma LT é comum mudanças no tipo de torre ao longo do percurso com uso, por

	considerando a estrutura típica	exemplo, de torre do tipo estaiada e autoportante. Esta mudança ocorre conforme tipo de terreno, relevo e trajeto da LT. Porém de forma ampla não ocorrem variações na separação entre os condutores e na disposição dos mesmos ao longo da estrutura.
	Separação entre condutores	
Variável	Resistência do condutor	A resistência de um condutor elétrico pode sofrer alteração devida à mudança de temperatura do condutor seja pela temperatura ambiente ou devido ao carregamento do condutor.
	Altura do vão médio	A altura da estrutura da torre e do vão médio podem apresentar mudanças significativas ao longo do percurso da LT devido a fatores como mudanças de relevo, travessias, vegetação, dilatação linear do condutor e outros.
	Resistividade do solo	Ao longo de sua extensão uma torre pode atravessar terrenos com diferentes características e alguns casos trechos de rio que alteram a resistividade do solo. Da mesma forma a resistividade pode alterar conforme umidade do terreno e clima. Desta forma este parâmetro é passível de ajuste ao longo do tempo.
	Comprimento da LT	Pode apresentar erros com relação ao projeto básico devida mudanças de trajeto com relação ao projeto básico, variação na altura das estruturas, catenárias nas torres, outros.

Desta forma, conforme justificativas apresentadas na Tabela 5, para o estudo em questão, dentre os parâmetros da LT disponíveis, foram consideradas a resistência dos condutores, a altura do vão médio, a resistividade do solo e o comprimento total da LT. Finalmente apresenta-se a estrutura do indivíduo otimizado com apenas 4 variáveis a serem investigadas no processo de busca, conforme (33).

$$\text{Indivíduo} = [A B C D] \quad (33)$$

Conforme justificativas apresentada na Tabela 5 alguns parâmetros utilizados na modelagem da LT podem ser considerados constantes e é possível garanti-los conforme projeto com determinado grau de segurança. Adicionalmente, um menor número de variáveis permite um monitoramento melhor, pelo desenvolvedor, das mudanças nas variáveis, de forma a verificar se as mudanças estão coerentes com os fenômenos físicos e realizar ajustes necessários na modelagem da solução. Além dos benefícios apresentados, o número menor de parâmetros reduz o esforço computacional necessário para solução do problema.

Na próxima seção será realizada uma explicação mais detalhada sobre a aplicação do algoritmo genético na solução proposta.

3.2.3 População e processo evolutivo no AG

Em função das variações que ocorrem no indivíduo (33) são calculadas novamente as matrizes Z e Y da LT em estudo. No algoritmo desenvolvido para este trabalho, conforme mostrado na Figura 14, para cada processo iterativo ou para cada geração de indivíduo foram criados 100 novos indivíduos (33) que deram origem as novas matrizes Z e Y. A Figura 15 apresenta parte do código onde foram cadastrados parâmetros de parada do algoritmo e geração de indivíduos. Conforme apresentado na Figura 15, durante o processo iterativo a população é composta por 100 indivíduos. A parada do processo iterativo irá ocorrer quando atingir um determinado valor de grau de evolução, chamado neste trabalho de *EVA* estabelecido na simulação ou quando atingir um limite máximo de iterações definido para a simulação.

```
%PERGUNTA O NÚMERO DE VEZES QUE O PROCESSO DE ESTIMAÇÃO ACONTECERÁ
simula=80;

%grau de evolução (EVA) necessário para a parada do processo evolutivo
avaliacaomax=100;

%tamanho da população durante cada processo evolutivo ou de cada geração
de indivíduos criados
tamanho_populacao=100;
```

Figura 15 - Parâmetros algoritmo genético

As variações no indivíduo (33) foram realizadas de forma aleatória, porém de forma controlada. Para cada geração de indivíduo foi permitida variação máxima de $\pm 1\%$ em cada elemento que compõe indivíduo (33).

Cada indivíduo criado deve ser avaliado através da função objetivo. Através da equação (29) são calculados os valores da tensão $\dot{V}_{S_calculado}$ e corrente $\dot{I}_{S_calculado}$ considerando cada quadripolo, fruto das variações dos parâmetros da LT. Os valores da tensão \dot{V}_{Spmu} e da corrente \dot{I}_{Spmu} medidos por PMUs são utilizados para o cálculo do erro da seguinte forma.

$$[\Delta\dot{V}_{ABC}] = [\dot{V}_{Spmu}] - [\dot{V}_{S_calculado}] \quad (34)$$

$$[\Delta\dot{I}_{ABC}] = [\dot{I}_{Spmu}] - [\dot{I}_{S_calculado}] \quad (35)$$

Utiliza-se os erros associados à cada indivíduo para definir um único parâmetro. Assim, para cada indivíduo é calculado o *grau de evolução (EVA)* que é obtido por (36), (37) e (38).

$$evaV = |\Delta\dot{V}_A| + |\Delta\dot{V}_B| + |\Delta\dot{V}_C| \quad (36)$$

$$eval = |\Delta\dot{I}_A| + |\Delta\dot{I}_B| + |\Delta\dot{I}_C| \quad (37)$$

Através das equações (36) e (37) é associado um grau de evolução *EVA* determinado por (38).

$$EVA = (evaV + eval)^{-1} \quad (38)$$

A Figura 16 apresenta esta função aplicada ao algoritmo desenvolvido.

```
VSerrof(xx,:)=(VScf-VSf)/max(abs(VSf));
ISerrof(xx,:)=(IScf-ISf)/max(abs(ISf));
vxxx(xx,:)=VSf;
ixxx(xx,:)=ISf;

avaliacao(xx)=(abs(VSerrof(xx,1))+abs(VSerrof(xx,2))+abs(VSerrof(xx,3))+
abs(ISerrof(xx,1))+abs(ISerrof(xx,2))+abs(ISerrof(xx,3)))^-1;
```

Figura 16 - Aplicação da função objetivo e EVA

Nas próximas seções serão realizadas explicações sobre como foram determinados os parâmetros do Algoritmo Genético.

3.2.3.1 Determinação do Grau de Evolução - *EVA*

O limite do grau de evolução *EVA* está diretamente relacionado à solução do problema através da otimização do quadripolo apresentada na equação (29). Assim como, ao utilizar dados reais de PMUs, o limite do grau de evolução tem relação direta com os erros nos instrumentos de medição e do TVE associado a PMUs em regime permanente.

No capítulo 2 foi apresentado o conceito de TVE associado a PMU. Para as aplicações em regime permanente, conforme apresentado na Tabela 3, as unidades de medição fasorial sincronizada, por norma, devem apresentar TVE inferior a 1%. Na seção 2.5 também foi realizado estudo sobre os erros associados aos transformadores de instrumentos. Conforme revisão realizada não há uma correspondência direta entre os erros previstos nas normas de TCs e TPs com o conceito de TVE apresentado na norma C37.118.1/2011. Porém, nos trabalhos [23] e [24] os autores correlacionam os conceitos de erros nos transformadores de instrumentos e o conceito de TVE permitindo realizar uma comparação direta entre os erros nos instrumentos de medição e TVE. As variações no TVE ocorreram conforme relação de transformação utilizada, carga conectada ao terminal secundário e valor secundário (1A ou 5A) para os casos dos TCs.

Como não há especificações em norma para esta correlação, erros nos TIs e TVE, foi considerado como um primeiro critério de parada do algoritmo o valor de $EVA = 100$ que é equivalente ao erro de 1%. Considerando os erros associados da PMU e instrumentos de medição é esperado erro superior a 1%, porém por se tratar de um desenvolvimento inicial foi mantido o *EVA* de 1% de forma a também avaliar os limites de evolução ao longo das simulações.

3.2.3.2 Número máximo de iterações

No algoritmo proposto o critério de parada do processo iterativo ocorre de duas formas que são:

- Ao atingir um valor mínimo de *EVA* pré determinado conforme exposto na seção 3.2.3.1
- Baseado em número máximo de iterações ou repetições do processo evolutivo.

O número máximo de iterações foi definido conforme desenvolvimento dos testes realizados. A Figura 17 mostra uma curva típica de grau de evolução identificada durante os testes com o algoritmo, sendo possível observar que nos primeiros processos iterativos há um crescimento com uma característica exponencial, porém aproximadamente entre 12^o e 15^o processo iterativo o algoritmo chega a um patamar onde não são identificados aumentos significativos no grau de evolução.

Desta forma para o critério de parada foram estabelecidos valores superiores a 20 processos iterativos com objetivo de atender este patamar com característica constante do EVA. Adicionalmente, em alguns casos, foram utilizados valores maiores como, por exemplo, de 80 iterações para que se pudesse observar o comportamento do sistema ao longo do tempo.

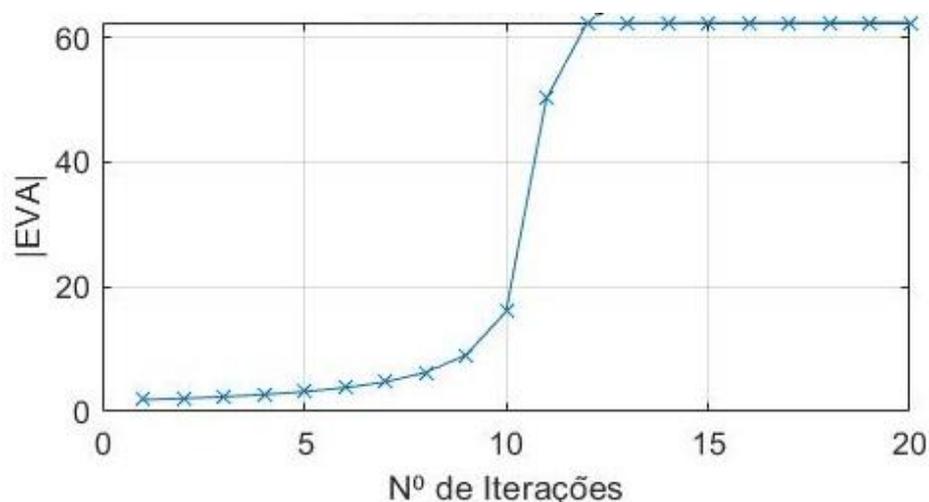


Figura 17 - Curva típica - Grau de Evolução | EVA

O número de iterações está diretamente ligado à capacidade da metodologia proposta em rastrear as mudanças das características da LT ao longo do tempo. O tempo de otimização deve ser o menor possível para que o passo de resultados de otimização ao longo do tempo seja o menor possível. Assim, obter o menor número de iterações que garanta estabilidade do processo de busca é fundamental.

3.2.3.3 Tamanho da população

Durante avaliações do algoritmo foram realizados testes com diversos tamanhos de população. É possível observar que durante o processo de iteração com o aumento do tamanho da população ocorre também maior esforço computacional aumentando o tempo de processamento do algoritmo. Desta forma empírica buscou-se identificar o tamanho adequado da população que apresenta bons resultados com relação à evolução do EVA, bem como para

minimizar esforço computacional. De forma geral para uma população com 100 indivíduos foi possível obter um crescimento do grau de evolução semelhante ao apresentado na Figura 17.

Durante cada processo iterativo foi limitada a variação de cada parâmetro do indivíduo base [32] em $\pm 1\%$. Esta limitação teve o objetivo de gerar variações menores e permitiu alteração mais controlada dos indivíduos, possibilitando o acompanhamento das mudanças e o rastreamento da compatibilidade entre as mudanças realizadas e os fenômenos físicos. Cabe mencionar que a variação de $\pm 1\%$ se mostrou eficiente durante o processo iterativo, obtendo-se ganhos no desempenho do algoritmo junto com o número estabelecido de indivíduos e iterações.

A Tabela 6 apresenta, em resumo, os parâmetros aplicados no AG conforme justificativas apresentadas acima.

Tabela 6- Parâmetros AG

Parâmetros AG	
<i>EVA</i>	100
Nº de iterações	>20
Tamanho da população	100
Variação máxima no indivíduo	$\pm 1\%$

3.2.3.4 Processo Iterativo

Após determinação dos parâmetros do AG inicia-se a etapa de processo iterativo onde ocorre a formação aleatória de novos indivíduos com objetivo de encontrar melhores indivíduos que atendam a igualdade apresentada na equação (29). A Figura 18 demonstra de forma mais detalhada o fluxograma do algoritmo desenvolvido neste trabalho.

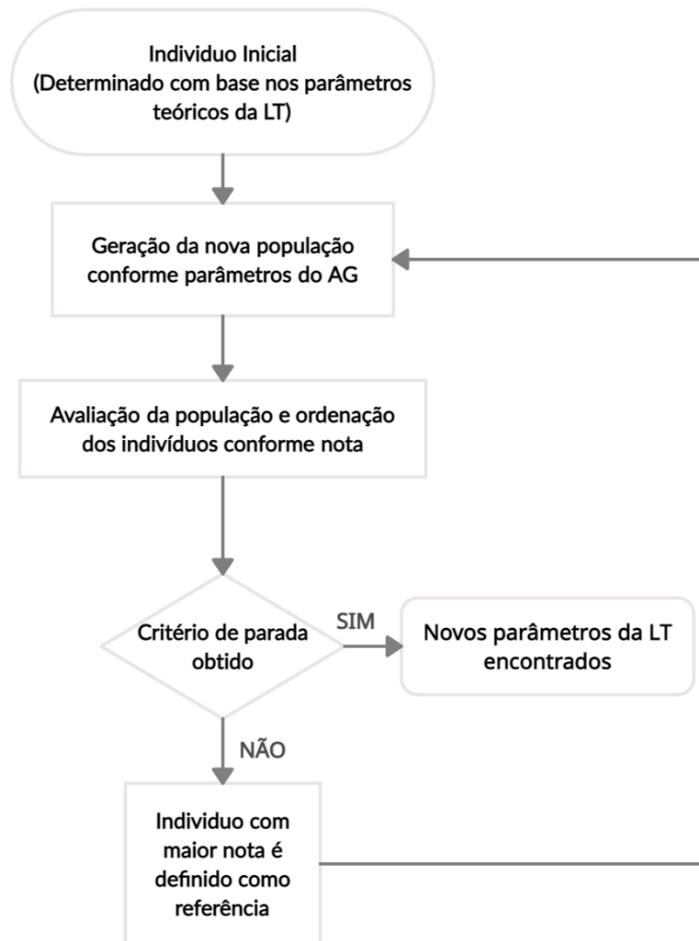


Figura 18 - Fluxograma do algoritmo genético utilizado neste trabalho

A primeira população é composta por 100 indivíduos iguais e com valores correspondentes aos parâmetros de projeto. Para o AG desenvolvido, a população prole é composta pela mesma quantidade de indivíduos nos quais os valores são aleatoriamente alterados dentro da faixa correspondente aos valores máximos e mínimos, em porcentagem, dos respectivos parâmetros de projeto.

Após avaliação de todos os indivíduos através da função objetivo apresentada na Figura 14, considera-se apenas o indivíduo mais forte para o próximo ciclo. Este novo indivíduo mais forte é tomado como referência e são realizadas novas variações aleatórias, dentro dos limites parametrizados no algoritmo, com objetivo de gerar novos indivíduos mais evoluídos. Através da função objetivo estes novos indivíduos são avaliados para verificar se há uma melhora no grau de evolução. Caso seja gerado novo indivíduo com maior grau de evolução este passa ser a nova solução para o problema e se torna indivíduo referência para um novo processo de evolução.

O processo evolutivo segue, conforme teoria apresentada na seção 2.6.3, de forma a continuar em busca de indivíduos que melhor atendam a solução do problema até atingir o critério de parada estabelecido para o problema.

3.3 Sensibilidade na variação dos elementos

Com o intuito de verificar a influência de cada parâmetro nas variações das matrizes Z e Y foi realizada avaliação de forma independente de cada elemento passível de variação nos parâmetros concentrados da linha de transmissão. Esta análise tem objetivo de melhorar o entendimento do impacto de cada um destes itens nos parâmetros da linha e dar suporte para compreender melhor o otimizador proposto. De forma geral, em LTs as proteções de distância em zona 1 são ajustadas para alcance máximo de 80% de forma a acomodar erros de leitura de TCs, TPs e possíveis erros nos parâmetros das LTs. Desta forma foram realizadas simulações considerando variações nos parâmetros da LT em $\pm 20\%$. De maneira ampla, nos estudos do sistema elétrico, é mais comum o uso dos parâmetros concentrados de sequência positiva (Z_1 e Y_1) e zero (Z_0 e Y_0).

Os testes foram realizados utilizando o *software* MATLAB, considerando modificações conhecidas nas características passíveis de variação que são altura do vão médio, resistência do condutor, resistividade do solo e comprimento da LT, conforme apresentado na seção 3.2.1. Para realização de cada teste foi permitida variação somente do elemento em análise. Ao invés de realizar modificações aleatórias no indivíduo foram realizadas modificações conhecidas no elemento entre -20% a $+20\%$.

Nas Figuras de 19 a 24 estão representadas as variações dos parâmetros passíveis de mudanças discutidos na tabela 5 e o impacto nos parâmetros concentrados de impedância e admitância em componentes de sequência positiva e zero da LT. Como o comprimento possui efeito linear nos parâmetros concentrados estes não foram apresentados para deixar as imagens mais nítidas.

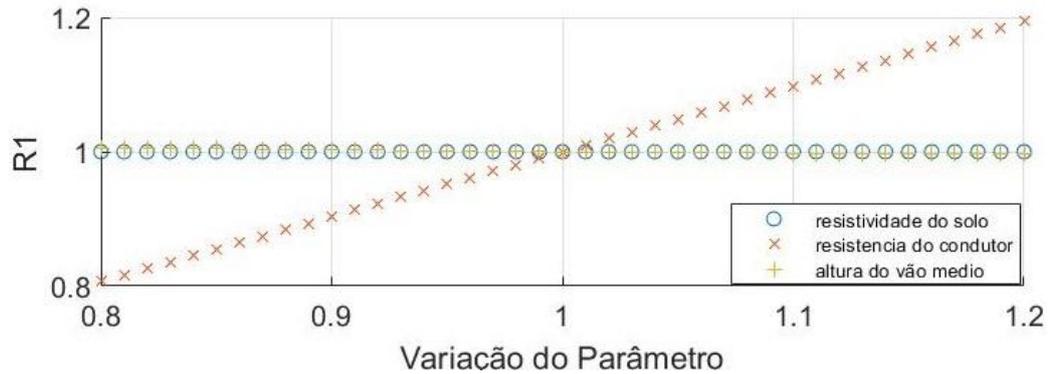


Figura 19 - Sensibilidade do parâmetro concentrado R1 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.

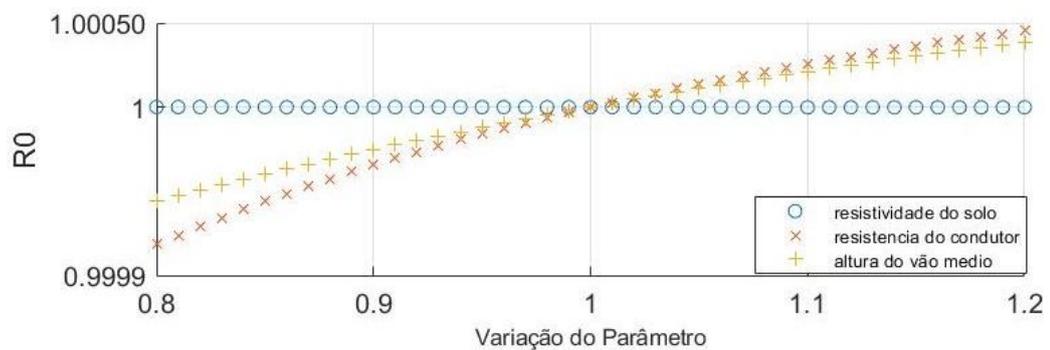


Figura 20 - Sensibilidade do parâmetro concentrado R0 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.

Como se pode observar, os parâmetros R1 e R0 são mais sensíveis a variação da resistência do condutor e menos sensíveis aos parâmetros referentes a resistividade do solo e altura do vão médio. A resistência de sequência positiva R1 apresentou variação linear e a máxima de $\pm 20\%$ para o parâmetro de resistência do condutor, enquanto que R0 apresentou variação máxima de $\pm 6\%$. O parâmetro R1 basicamente não apresentou variação para os demais parâmetros estudados, enquanto o R0 apresentou variação de $\pm 2\%$ para o parâmetro resistividade do solo e altura do vão médio.



Figura 21 - Sensibilidade do parâmetro concentrado X1 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.

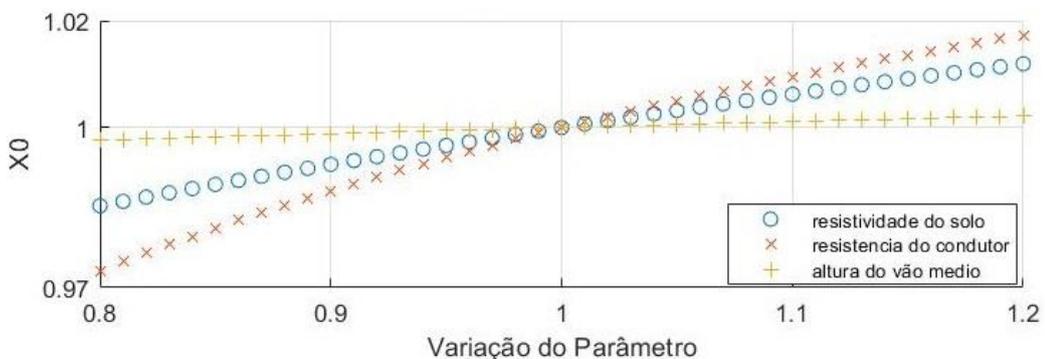


Figura 22 - Sensibilidade do parâmetro concentrado X0 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.

Como se pode observar, os parâmetros concentrados X1 e X0 praticamente não apresentam nenhuma sensibilidade às características estudadas. A variação máxima identificada para o parâmetro X1 foi inferior 0,01% para resistência do condutor. O parâmetro X0 também apresenta maior variação para mudanças na resistência do condutor sendo esta sensibilidade inferior a $\pm 0,05\%$.

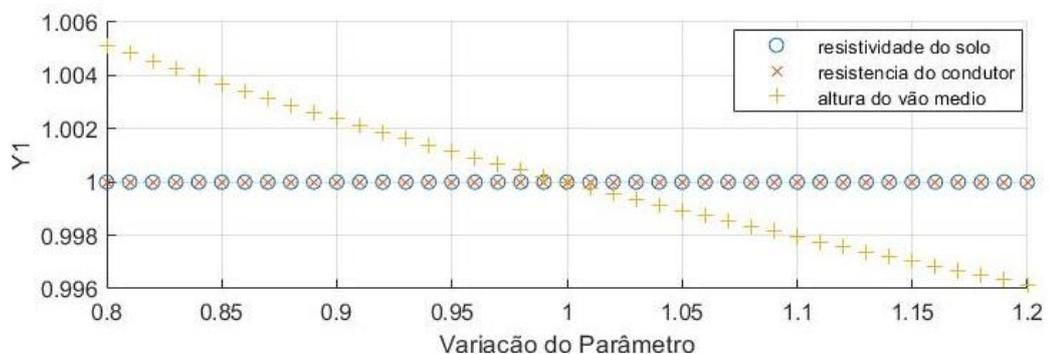


Figura 23 - Sensibilidade do parâmetro concentrado Y1 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.

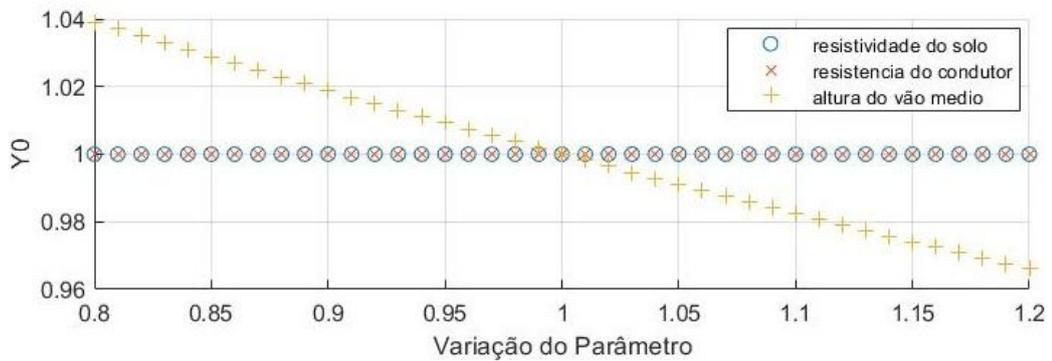


Figura 24 - Sensibilidade do parâmetro concentrado Y0 frente as variações na resistividade do solo, resistência do condutor e altura do vão médio.

Como se pode observar, os parâmetros concentrados Y1 e Y0 praticamente não apresentam nenhuma sensibilidade às características estudadas. A variação máxima identificada para o parâmetro Y1 foi inferior 0,01% para altura do vão médio. O parâmetro Y0 também apresenta maior variação para mudanças na altura do vão médio, sendo esta sensibilidade inferior a $\pm 0,05\%$.

Importante destacar que mesmo os parâmetros concentrados da LT (R1, R0, X1, X0, Y1 e Y0) apresentam variação linear com relação ao comprimento da linha de transmissão. Desta forma, sendo identificada alteração no comprimento da LT, todos os parâmetros concentrados avaliados deverão apresentar modificações.

3.4 Características do Sistema Utilizado

Para desenvolvimento do trabalho foi realizado um estudo utilizando dados reais de PMU instaladas em uma linha de transmissão pertencente ao SIN. Nesta seção serão apresentadas as características da LT estudada, bem como as características do sistema de PMU utilizado.

3.4.1 Linha de Transmissão

Para desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados de PMU e oscilografia da linha de transmissão 500kV Nova Ponte x Estreito pertencente ao SIN. A referida LT fica localizada no estado de Minas Gerais e possui os seguintes parâmetros teóricos calculados durante a etapa de projeto básico, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros da Linha de Transmissão - LT 500kV Estreito x Nova Ponte

Parâmetros Concertados	
R1	0,0230 Ω /km
X1	0,3462 Ω /km
R0	0,3672 Ω /km
X0	1,4312 Ω /km
Y1	4,8020*10 ⁻⁶ S/km
Y0	3,1409*10 ⁻⁶ S/km
Resistividade do solo	1000 Ω .m
Comprimento	140,1 km

A Figura 25 mostra um diagrama unifilar com a localização da referida LT no SIN (destacada em amarelo), para melhor compreensão do leitor. Tal LT é bastante relevante para a região do sistema.

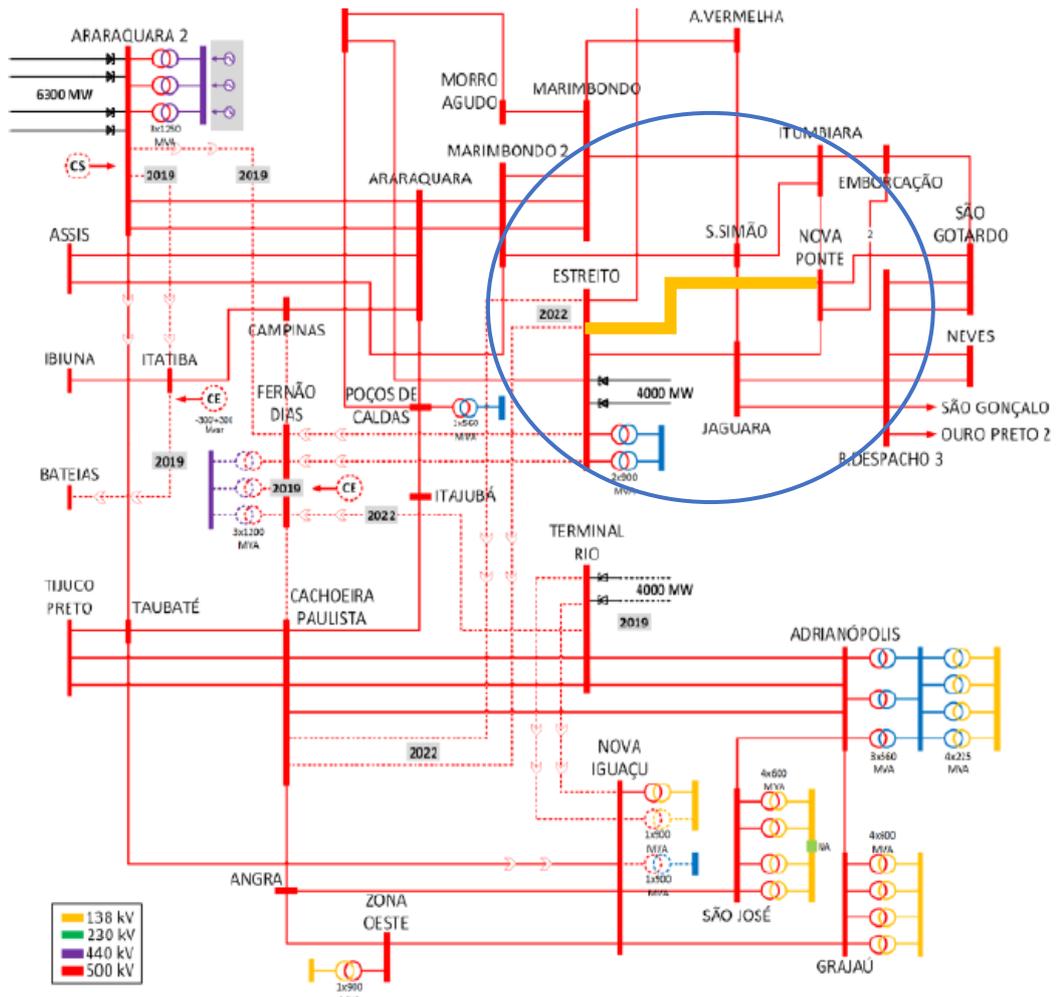


Figura 25 - Mapa elétrico indicando o ponto de conexão da LT 500kV Estreito x Nova Ponte

A LT 500kV Estreito x Nova Ponte apresenta esquema de transposição conforme apresentado na Figura 26.

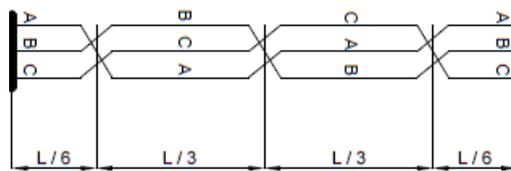


Figura 26: Esquema de transposição da LT 500kV Estreito x Nova Ponte

A linha de transmissão também possui características construtivas, estabelecidas no projeto básico, conforme apresentada nas Tabela 8 e 9.

Tabela 8 - Características construtivas - Projeto Básico

Espaçamento horizontal entre fases	10,60 m
Espaçamento horizontal entra cabos para-raios	18 m
Altura do condutor ao solo, na terra	29 m
Altura do cabo para-raios ao solo	37,6 m
Flecha do cabo condutor	19,41 m
Flecha do cabo para-raios	15,79 m

Tabela 9 - Características dos cabos condutores e para-raios

Características dos cabos condutores			
Tipo	CAA	Bitola	954kcmil
Formação	45/7	Código	Rail
Cabos por fase	3		
Cabos Para-raios			
Tipo	CAA	Bitola	176.9kcmil
Formação	12/7	Código	DOTTEREL
Cabos por fase	1		

A Figura 27 abaixo apresenta um modelo de estrutura típica utilizada na linha de transmissão em estudo. A LT possui diferentes tipos de torres como, por exemplo, torres estaiadas e autoportante, porém as características do topo da torre que determinam a distância entre cabos condutores e para-raios permanece constante.

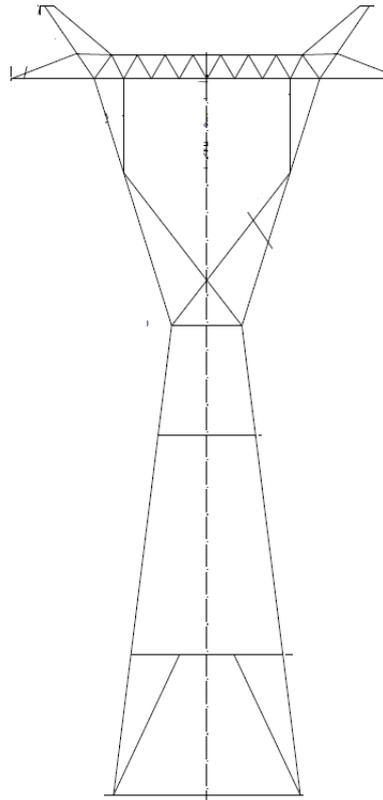


Figura 27 - Estrutura típica utilizada no projeto

O sistema de proteção e de PMUs da LT 500kV Nova Ponte x Estreito é conectado em um transformador de corrente com relação de transformação de 3000/5A.

3.4.2 Sistema de Medição Sincrofasorial Utilizado

Em ambos os terminais da LT, em estudo, foram implantadas PMUs do fabricante GE. Na solução apresentada pelo fabricante é aplicada uma arquitetura distribuída composta por dois módulos. O primeiro módulo é responsável por realizar a leitura dos sinais de tensão e corrente e enviar para o segundo módulo responsável pelo processamento dos dados e envio dos sinais para o PDC. Por sua vez o módulo de processamento é conectado em um sistema GPS para sincronismo de sinais. A solução descrita é apresentada na Figura 28.

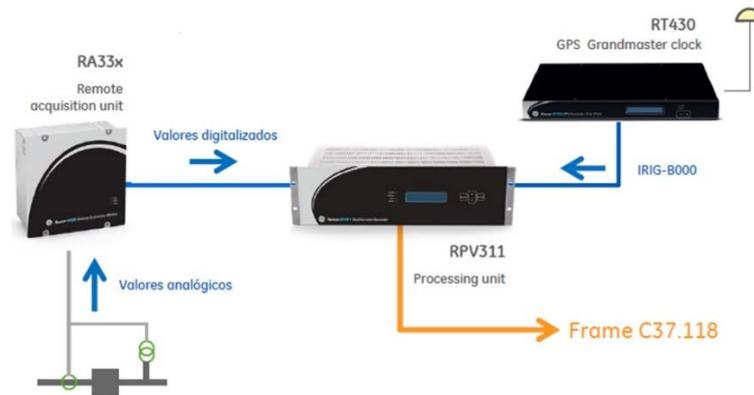


Figura 28 - Arquitetura local da subestação

As informações das PMUs instaladas nos terminais da LT de referência deste trabalho enviam, através de canais de comunicação, os dados de sincrofasores para o PDC instalado no escritório da transmissora conforme representado na Figura 29. Com a utilização do PDC é possível agrupar os dados sincronizados em um servidor e realizar o armazenamento e organização dos dados para aplicação em diferentes soluções. O PDC, instalado no escritório da transmissora e utilizado para desenvolvimento deste trabalho, é o OpenPDC desenvolvido pela *Grid Protection Alliance* “GPA”.

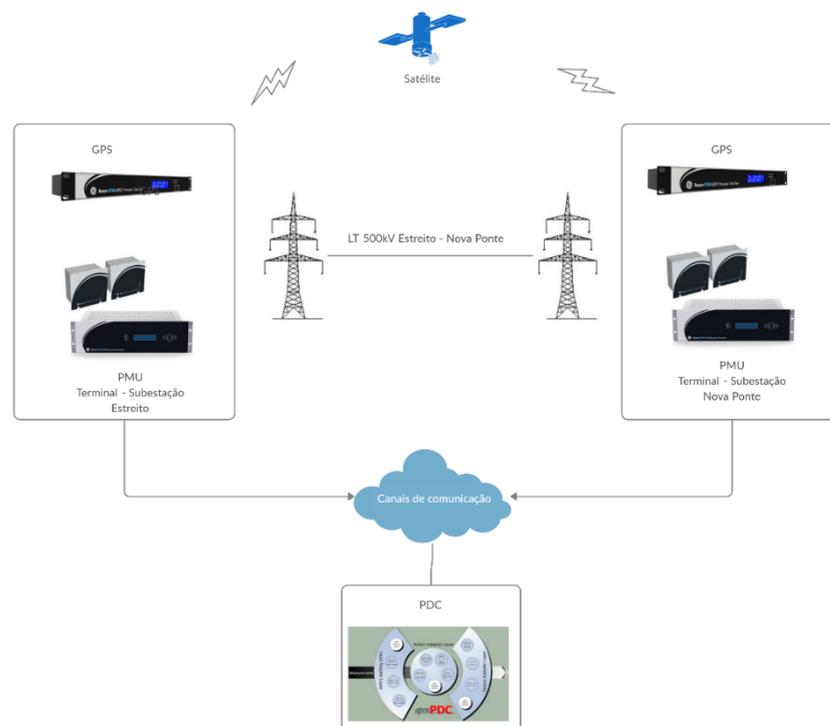


Figura 29 - Arquitetura simplificada - PMU vs PDC - Canais de Comunicação

O OpenPDC é uma plataforma que concentra dados fasoriais sincronizados de alto desempenho [32]. O *software* está em produção desde 2004, possui código aberto e sem custos de licenciamento. O sistema é capaz de receber dados de sincrofasores de unidades de medição fasorial e armazenar em um banco de dados. O OpenPDC também pode funcionar como um distribuidor de dados, agregando sincrofasores vindos de diferentes PMUs, e reenviar através de novos fluxos definidos pelo usuário para um outro PDC ou sistema seguindo o padrão C37.114/2011.

Integrado ao OpenPDC há uma aplicação chamada de *Historian Trending Tools* que permite exportar os dados armazenados no banco de dados do PDC para arquivos em formato CSV ou *comtrade*. Esta aplicação também permite gerar gráficos, a partir de um banco de dados, tornando possível a visualização de dados históricos do PDC. A ferramenta *Historian Trending Tools* foi utilizada neste trabalho para exportar os dados PDC para o formato CSV para que possam ser utilizados na aplicação proposta. A Figura 30 apresenta esquema simplificado da solução descrita.

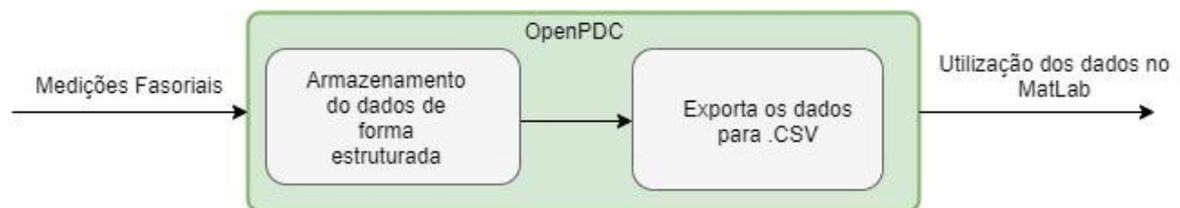


Figura 30 - Esquema de utilização da ferramenta *Historian Trending Tools*

As PMUs conectadas no PDC da transmissora enviam dados a 60 *frames* por segundo. O banco de dados associado ao OpenPDC permite arquivar todos os *frames* de dados recebidos.

Porém, para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados com intervalo de 1 minuto entre eles. Esta seleção teve objetivo de reduzir o volume de dados a serem processados. Adicionalmente supõem-se que possíveis variações em uma linha de transmissão ao longo do tempo não ocorrem de forma instantânea.

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia aplicada para solução do problema proposto mostrando como os dados de PMU e conceitos de algoritmos genéticos se integram

para realizar o estudo proposto. Os dados fornecidos pelas PMUs juntamente com os parâmetros de projeto da LT são aplicados no algoritmo genético que irá processar as informações e buscar parâmetros que correspondem de forma mais fidedigna ao modelo real da LT. Porém os erros associados aos TCs e TPs impactam no resultado da modelagem ao introduzirem incertezas nas medições.

A solução do problema apresentado neste trabalho consiste em considerar que o quadripolo da LT, equação (21), estará correto quando os parâmetros da linha de transmissão estiverem corretos conforme modelo real da LT. Sendo assim, foi apresentada proposta de otimização das matrizes Z e Y da LT.

Através das grandezas elétricas medidas através das PMUs (\dot{V}_{Spmu} , \dot{I}_{Spmu} , \dot{V}_{Rpmu} e \dot{I}_{Rpmu}) e do uso de algoritmo genético foi apresentada metodologia para identificar os parâmetros concentrados de sequência positiva e zero que melhor representam o modelo da LT durante o momento das amostras coletadas.

Adicionalmente neste capítulo destacou-se o sistema de PMU instalado em uma linha de transmissão real pertencente ao SIN. O sistema real implementado servirá como fonte de dados para testes e validações reais no próximo capítulo. Além dos dados de PMU foram apresentadas o sistema PDC utilizado para coleta dos dados.

Com base na metodologia de otimização dos parâmetros de LT proposta são esperados os seguintes resultados nos próximos capítulos:

- Rastrear variações de parâmetros criadas a partir de modelo teórico da LT, considerando o projeto básico. No ATP serão criados diversos cenários de mudanças nos parâmetros da LT e através de modificações conhecidas no modelo é esperado que o algoritmo proposto seja capaz de rastrear as variações realizadas;
- Com base nos dados reais de PMU coletados da LT 500kV Estreito x Nova Ponte e apenas informações iniciais do projeto da LT serão apresentados os EVAs ao longo do tempo para confirmar que variações diversas dos parâmetros da LT acontecem ao longo do tempo de análise;
- Com os dados reais de PMU coletados da LT 500kV Estreito x Nova Ponte será realizado rastreamento na LT por diferentes períodos de tempo e em diferentes

anos para demonstrar que variações no modelo da LT ocorrem ao longo do tempo e que a metodologia proposta é capaz de rastrear as mudanças;

- Adicionalmente, para buscar validação do algoritmo aplicado a um sistema real de medição de fasores sincronizados serão apresentados testes associados ao método de localização de faltas em LTs utilizando planilha de sequência negativa. O modelo de localização de faltas por sequência negativa utiliza os parâmetros de impedância da LT como dados de entrada para determinação do ponto de falta. Com a otimização dos parâmetros da LT há expectativa de obter melhor precisão no método.

4 Simulações e Resultados

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os testes realizados com base nos dados simulados e reais utilizando sempre como base os dados da linha de transmissão de referência apresentada no capítulo 3. Este capítulo está estruturado da seguinte forma.

Para validação do modelo de trabalho e algoritmo proposto serão apresentados testes teóricos com auxílio do *software* ATP. A linha de transmissão de referência foi modelada no ATP e através desta modelagem foram realizadas modificações conhecidas no sistema permitindo avaliação do algoritmo proposto e a sua capacidade rastreadabilidade dos parâmetros da LT.

Com base no conceito de *EVA* também serão apresentados testes utilizando dados reais de PMU da LT referência. Estes testes propõem, sem realizar nenhum tipo de otimização, verificar possíveis variações do *EVA* da LT ao longo do tempo. Posteriormente serão apresentados resultados semelhantes com a otimização da LT e comparar os resultados da LT com e sem otimização ao longo do tempo analisado.

Devida à dificuldade de validar se os parâmetros otimizados da LT de referência efetivamente representam de forma mais fidedigna o modelo real da LT, neste capítulo também serão realizados testes utilizando métodos de localização de falta para avaliar se será possível obter melhores resultados no cálculo de localização de faltas corroborando as expectativas de otimização dos parâmetros da LT.

Antes de iniciar a demonstração dos resultados serão apresentadas as ferramentas ATP e MATLAB para mostrar como foram utilizadas para realização dos testes e na solução do problema apresentado.

4.2 Ferramentas de auxílio MATLAB e ATP

Para implantação do algoritmo e execução das simulações foi utilizado o *software* de computação numérica interativo e de alto desempenho para cálculos matemáticos MATLAB.

O MATLAB possui uma linguagem de programação simples e direta e uma biblioteca de funções matemáticas pré-definidas. Além disso o *software* permite construção de gráficos e a criação de rotina matemática permitindo a realização de cálculos avançados.

Desta forma, com o uso do MATLAB, foi implementada rotina de cálculo de parâmetros de linha de transmissão semelhante ao aplicado no ATP permitindo o cálculo das matrizes de impedância e admitância da LT em estudo. No MATLAB também foram implementadas as rotinas do algoritmo genético.

No desenvolvimento dos testes e resultados também foi utilizado o *software Alternative Transients Program (ATP)*. O ATP é um programa amplamente utilizado para simulação computacional de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica em sistemas elétricos de potência. O início de seu desenvolvimento, ainda sob o nome de *Electromagnetic Transients Program (EMTP)*, ocorreu na década de 1960. Através do ATP é possível modelar desde componentes básicos, como resistores lineares, indutores, capacitores, fontes ideais e chaves controladas por tempo, até componentes complexos, como LTs, elementos não lineares e sistemas de controle.

Atualmente, o ATP é amplamente utilizado para modelagem e cálculo de parâmetros de linhas transmissão. Incluindo os dados de projeto de uma LT no sistema é possível obter os parâmetros da linha de transmissão em estudo utilizando equacionamento semelhante ao apresentado na seção 2.3. Adicionalmente, é possível inserir o modelo de uma LT no *software*, juntamente com fontes de tensão, cargas e outros componentes de estudo e obter, por exemplo, dados de medição e corrente no sistema durante o período de simulação. Esta funcionalidade será explorada no capítulo 3 como ferramenta de auxílio para validação do algoritmo proposto. Com auxílio do ATP serão realizadas modificações conhecidas no sistema para verificar a capacidade de rastreabilidade do algoritmo desenvolvido.

4.3 Validação do algoritmo utilizando modelo teórico

Com o objetivo de validar a metodologia aplicada e o algoritmo implementado foram realizados testes de validação utilizando o ATP. Os testes para validação foram realizados aplicando a seguinte metodologia.

- No projeto básico da LT de referência são informados os parâmetros e premissas consideradas na modelagem da LT. Foi executada a rotina LCC no *software* ATP obtendo os parâmetros $R1$, $X1$, $R0$, $X0$, $Y1$ e $Y0$ da LT em estudo. Como os dados utilizados foram os mesmos do projeto básico, foram obtidos os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 7.
- Na sequência foi aplicada uma fonte de tensão em um dos terminais da LT e uma carga no outro terminal possibilitando criar um fluxo de potência passando pelo sistema. Foram inseridos medidores de tensão e corrente em ambos os terminais da LT para obter as medições trifásicas passando pela linha em estudo. A Figura 31 representa o esquema de simulação descrito.

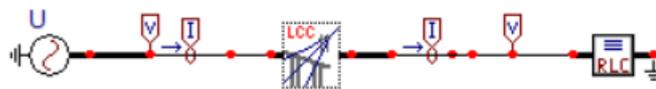


Figura 31 - Modelo criado no ATP

- Através das medidas de tensão e corrente, obtidas no ATP, foi possível calcular os fasores de tensão e corrente e criar um cenário de dados semelhante ao obtido através de uma PMU. Para verificar a capacidade de rastreabilidade do algoritmo foram realizadas variações conhecidas nos parâmetros da LT e foi observado se o algoritmo seria capaz identificar as novas características da LT.

Esta metodologia foi aplicada, pois além da dificuldade de validar a proposta de rastreabilidade com dados reais da LT é possível verificar o comportamento dele para diferentes variações no sistema. A Figura 32 apresenta fluxograma do modelo descrito.

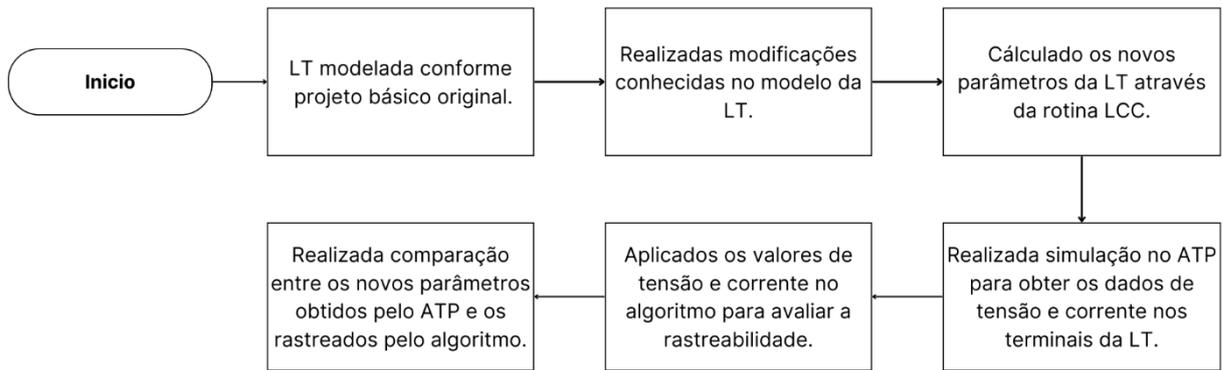


Figura 32 - Fluxograma - Validação do algoritmo com auxílio do ATP

Antes de apresentar os resultados dos testes teóricos propostos foi realizada uma validação da modelagem do ATP e o otimizador proposto implementado no MATLAB. Esta comparação tem objetivo demonstrar que ambas as aplicações apresentam resultados semelhantes e, neste cenário, é esperado alto grau de EVA dado que os erros sejam apenas numéricos.

Simulando com os dados geométricos da linha original no ATP e no MATLAB foram obtidos os dados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados originais - Comparação ATP x MATLAB

	ATP	MATLAB
R1	0,0230 Ω/km	0,0212 Ω/km
X1	0,3462 Ω/km	0,3469 Ω/km
R0	0,3672 Ω/km	0,3657 Ω/km
X0	1,4312 Ω/km	1,4294 Ω/km
Y1	4,802*10 ⁻⁶ S/km	4,810*10 ⁻⁶ S/km
Y0	3,141*10 ⁻⁶ S/km	3,176 *10 ⁻⁶ S/km

Ao avaliar o grau de evolução, sem nenhum processo de otimização, entre os dados teóricos do ATP e da função de cálculo do quadripolo no MATLAB verifica-se um grau de evolução EVA de aproximadamente 225,5. O resultado desta comparação confirma que a função de cálculo do quadripolo no MATLAB a partir dos parâmetros geométricos tem o mesmo desempenho do cálculo do ATP, assim como os resultados da função objetivo confirmam a relação das tensões e correntes no extremo da LT correspondem ao quadripolo obtido.

4.3.1 Cenários de testes teóricos no ATP

Nesta seção serão apresentados sete cenários de alteração na linha de transmissão divididos conforme proposta apresentada na Tabela 11. Os cenários foram testados de forma progressiva onde inicialmente foi verificada a rastreabilidade quando alterado uma característica da LT de forma isolada e posteriormente foram realizados testes alterando múltiplas características da LT.

Tabela 11 - Cenários teóricos simulados

Cenário	Alteração realizada
1	Comprimento da LT reduzido em 10% do valor original. Valor alterado de 140,1km para 126,9km.
2	Resistividade do solo reduzida em 15% do valor original. Valor alterado de 1000 Ω .m para 850 Ω .m.
3	Resistência dos condutores aumentada em 15% do valor original. Valor alterado de 0,0666 Ω /km para 0,0766 Ω /km.
4	Altura do vão médio reduzida em 10% do valor original. Valor alterado de 9,76m para 8,78m.
5	Comprimento da LT aumentado em 10% e altura do vão médio reduzida em 10% do valor original de projeto. <ul style="list-style-type: none"> • Comprimento da LT: De 140,1km para 154,1km; • Altura do vão médio: De 9,76m para 8,78m;
6	Comprimento da LT aumentado em 10%, resistividade do solo reduzida em 10% e altura do vão médio reduzido em 15%. <ul style="list-style-type: none"> • Comprimento da LT: De 140,1km para 154,1km; • Resistividade do solo: De 1000 Ω.m para 900 Ω.m; • Altura do vão do médio: De 9,76m para 8,74m;
7	Comprimento da LT aumentado em 10%, resistividade do solo reduzida em 10%, altura do vão médio reduzido em 15% e resistência dos condutores aumentada em 15%. <ul style="list-style-type: none"> • Comprimento da LT: De 140,1km para 154,1km; • Resistividade do solo: De 1000 Ω.m para 900 Ω.m; • Altura do vão do médio: De 9,76m para 8,74m; • Resistência dos condutores: De 0,0666 para 0,0766.

Para cada cenário estudado serão apresentados os novos valores dos parâmetros da LT, tanto obtidos pelo otimizador no MATLAB, quanto calculados no ATP e realizada comparação entre os mesmos. Os resultados estão organizados conforme mostrado abaixo onde:

- Z_p – Representa os valores originais da LT conforme projeto básico;
- Z_n – Representa os novos valores de impedância da LT calculados pelo ATP após realizada alteração na modelagem da linha de transmissão no *software*;
- Z_m – Representa os novos valores calculados pelo otimizador no MATLAB. Os valores calculados pelo algoritmo foram obtidos inserindo os valores de tensão e corrente obtidos no ATP, no modelo em MATLAB, como se fossem dados de PMU;
- $eZ(\%)$ - Os erros percentuais foram calculados com base nas diferenças entre os módulos Z_m e Z_n conforme equações (39) e (40).

$$eZ1(\%) = \left| \frac{Z_{1m} - Z_{1n}}{Z_{1n}} \right| \cdot 100 \quad (39)$$

$$eZ0(\%) = \left| \frac{Z_{0m} - Z_{0n}}{Z_{0n}} \right| \cdot 100 \quad (40)$$

4.3.1.1 Cenário 01 – Variação do comprimento da LT

No primeiro cenário foi realizada alteração apenas do comprimento da LT, no qual fora alterada para 90% do comprimento original. O resultado está apresentado na Tabela 12. O algoritmo apresentou resultado satisfatório conforme apresentado abaixo.

Tabela 12 - Resultado da simulação - Primeiro cenário

	Z_p (Ω)	Z_n (Ω)	Z_m (Ω)	eZ (%)
Z1	$3,22 + i48,50$	$2,92 + i43,93$	$2,68 + i43,95$	0,5470
Z0	$51,44 + i200,51$	$46,59 + i181,62$	$46,33 + i181,11$	0,3053
Y1	$i6,728e-04$	$i6,094 e-04$	$i6,094 e-04$	0,0000
Y0	$i4,401e-04$	$i3,986 e-04$	$i4,025 e-04$	0,9784

O algoritmo apresentou resultado satisfatório e ao final do rastreamento os erros foram inferiores a 1%. Adicionalmente foi avaliado o comprimento da LT identificado pelo algoritmo.

O novo comprimento estabelecido para a LT foi de 126,9km. Ao final do rastreamento o algoritmo identificou o valor de 126,7km. O grau de evolução EVA ao final do rastreamento foi de aproximadamente 175. A Figura 33 apresenta o grau de evolução e a evolução do rastreamento do novo comprimento da LT.

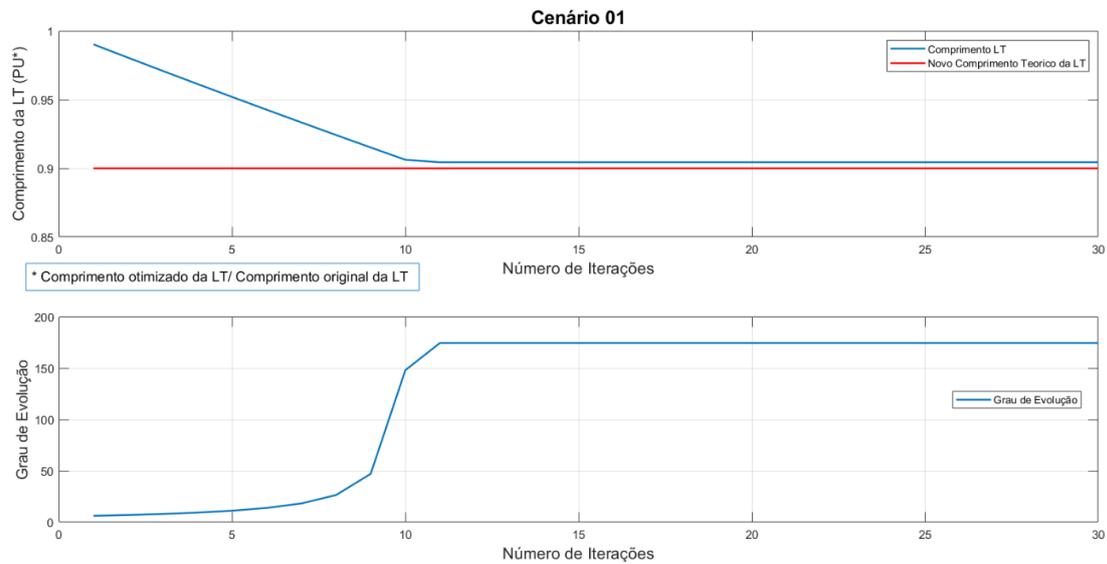


Figura 33 - Grau de evolução e variação do comprimento- Cenário 01

4.3.1.2 Cenário 02 – Variação da Resistividade do Solo

No segundo cenário foi realizada alteração somente em uma única característica da LT que no caso foi a resistividade do solo, na qual foi reduzida em 15% do valor original. O algoritmo apresentou resultado satisfatório conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado da simulação - Segundo cenário

	Z_p (Ω)	Z_n (Ω)	Z_m (Ω)	eZ (%)
Z1	$3,22 + i48,50$	$3,22 + i48,50$	$3,16 + i48,53$	0,1380
Z0	$51,44 + i200,51$	$50,70 + i198,41$	$49,98 + i200,48$	1,0702
Y1	$i6,728e-04$	$i6,728 e-04$	$i6,728 e-04$	0,0000
Y0	$i4,401e-04$	$i4,401 e-04$	$i4,443 e-04$	0,9543

Ao final do rastreamento os erros foram inferiores a 1%. Adicionalmente foi avaliada a resistividade do solo identificada pelo algoritmo ao final do processo iterativo.

A nova resistividade do solo estabelecida para a LT foi de 850 Ω .m. Ao final do rastreamento o algoritmo identificou o valor de 858 Ω .m. O grau de evolução ao final do rastreamento foi de aproximadamente 247. A Figura 34 apresenta o grau de evolução e a evolução do rastreamento da resistividade do solo. Um ponto de observação neste cenário está relacionado ao impacto da alteração na resistividade do solo com o grau de evolução. Mesmo com alteração de 15% da resistividade o grau de evolução na primeira iteração foi de aproximadamente 245. Confirma-se assim que variações na resistividade do solo impactam apenas os parâmetros de sequência zero e que o algoritmo foi capaz de rastrear a mudança.

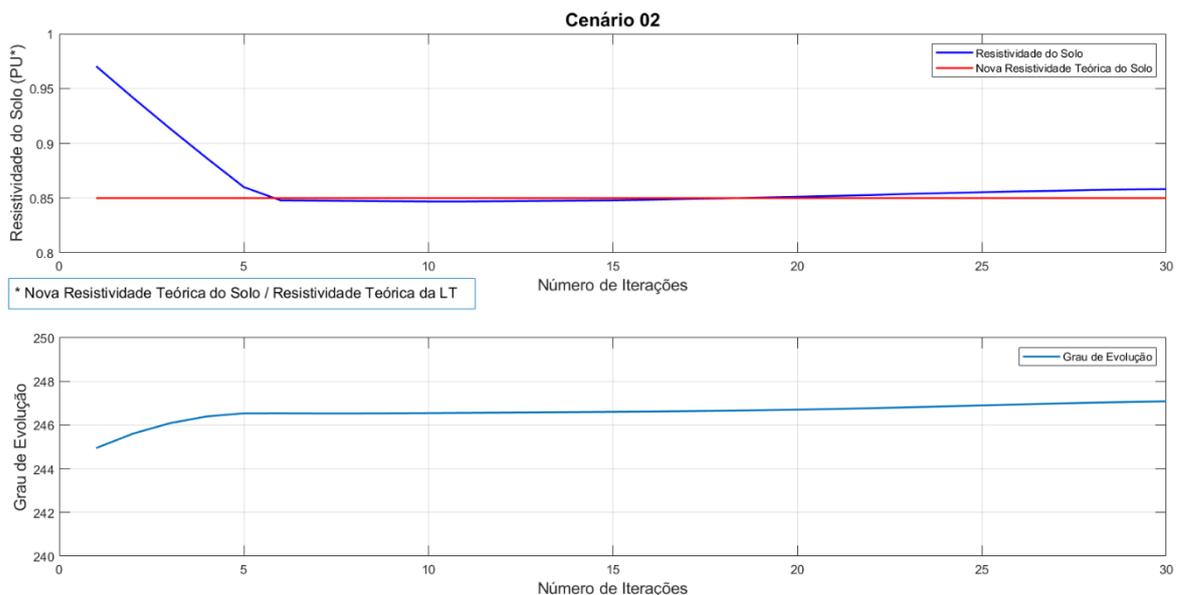


Figura 34 - Grau de evolução e variação da resistência do solo - Caso 2

4.3.1.3 Cenário 03 – Variação da resistência dos condutores

No terceiro cenário foi realizada alteração somente em uma única característica da LT que no caso foi a resistência dos condutores, na qual foi aumentada em 15% do valor original. O resultado está apresentado na Tabela 14. O algoritmo apresentou resultado satisfatório conforme apresentado abaixo.

Tabela 14 - Resultado da simulação - Terceiro cenário

	$Z_p (\Omega)$	$Z_n (\Omega)$	$Z_{0m} (\Omega)$	$e (\%)$
Z1	$3,22 + i48,50$	$3,68 + i48,50$	$3,73 + i48,61$	0,2484
Z0	$51,44 + i200,51$	$49,65 + i203,24$	$48,29 + i204,61$	0,9227
Y1	$i6,728e-04$	$i6,728e-04$	$i6,739 e-04$	0,1635
Y0	$i4,401e-04$	$i4,401 e-04$	$i4,450 e-04$	1,1134

O algoritmo apresentou resultado satisfatório e ao final do rastreamento os erros foram inferiores a 1%, com exceção do Y0 que ficou em 1,11%. Adicionalmente foi avaliada a resistência dos condutores identificada pelo algoritmo ao final do processo iterativo.

A nova resistência dos condutores estabelecido para a LT foi de 0,0767 Ω/km . Ao final do rastreamento o algoritmo identificou o valor de 0,0844 Ω/km . O grau de evolução ao final do rastreamento foi de aproximadamente 258. A Figura 35 apresenta o grau de evolução e a evolução do rastreamento da resistência do condutor. Um ponto de observação neste cenário está relacionado ao impacto da alteração na resistência do condutor no grau de evolução. Mesmo com alteração de 15% no parâmetro o grau de evolução na primeira iteração foi de aproximadamente 185. Essa observação sinaliza que qualquer aumento no EVA, mesmo ele já elevado, permite um bom rastreamento dos parâmetros alterados. Outro ponto importante consiste no erro obtido ao isolar a análise da resistência do condutor. Percebe-se que o algoritmo foi capaz de sinalizar o aumento da resistência, entretanto o valor alcançado (aumento de quase 30%) foi maior que a alteração de 15% efetuada no caso. Fica claro que a função objetivo, ao utilizar os parâmetros concentrados, não permite que o algoritmo obtenha o rastreamento do variáveis individuais relacionadas aos parâmetros da LT, mesmo conseguindo rastrear com sucesso os parâmetros concentrados Z1, Y1, Z0 e Y0.

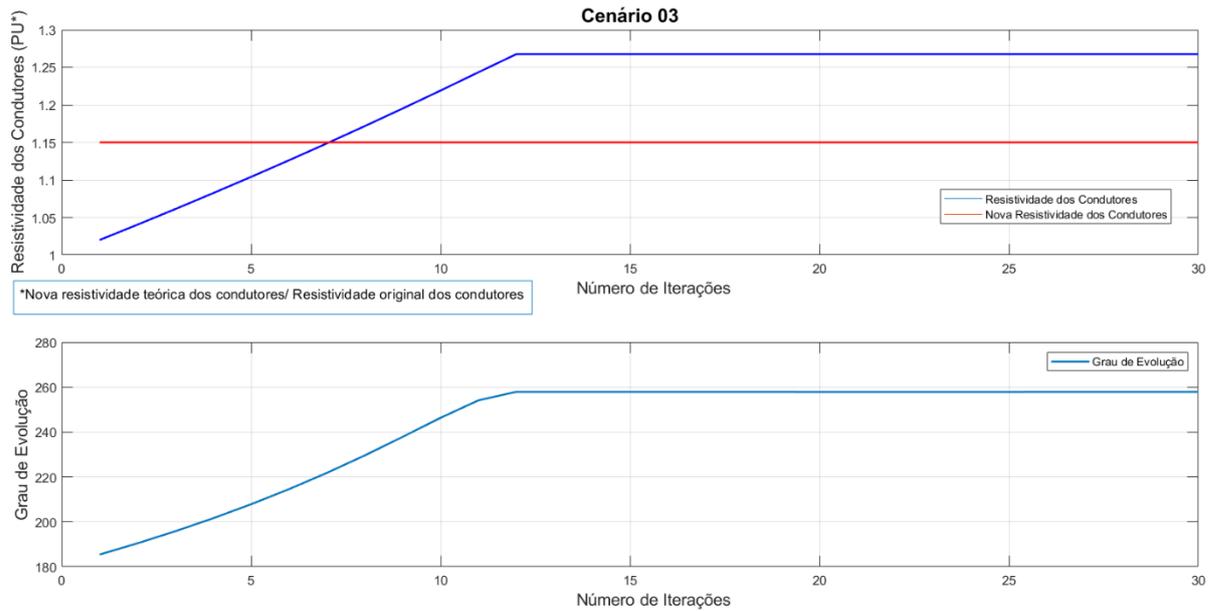


Figura 35 - Grau de evolução e variação da resistência do condutor - Cenário 03

4.3.1.4 Cenário 04 – Variação na altura do Vão Médio

No quarto cenário foi realizada alteração somente em uma única característica da LT que no caso foi altura do vão médio, reduzindo em 10% do valor original. O resultado está apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado da simulação - Quarto cenário

	Z_p (Ω)	Z_n (Ω)	Z_{0m} (Ω)	eZ (%)
Z1	3,22 + i48,50	3,23 + i48,50	2,97 + i48,60	0,5731
Z0	51,44 + i200,51	51,89 + i200,28	51,36 + i200,19	0,2598
Y1	i6,728e-04	i6,742e-04	i6,743 e-04	0,0148
Y0	i4,401e-04	i4,477e-04	i4,473 e-04	0,0893

O algoritmo apresentou resultado satisfatório e ao final do rastreamento os erros foram inferiores a 1%. Adicionalmente, foi avaliada a altura do vão médio identificada pelo algoritmo ao final do processo iterativo.

A nova altura do vão médio estabelecida para a LT foi de 8,78m. Ao final do rastreamento o algoritmo identificou o valor de 9,48m. O grau de evolução ao final do rastreamento foi de aproximadamente 321. A Figura 36 apresenta o grau de evolução e a evolução do rastreamento da altura do vão médio. Um ponto de observação neste cenário está relacionado ao impacto da

alteração na altura do vão médio no grau de evolução. Mesmo com alteração de 10% no parâmetro o grau de evolução na primeira iteração foi de aproximadamente 318. Destaca-se também que o otimizador proposto consegue rastrear corretamente os parâmetros concentrados de sequência, entretanto o resultado do parâmetro geométrico obtido como consequência não corresponde bem ao valor alterado. Isso era esperado, pois o otimizador considera variações em diversos parâmetros geométricos simultaneamente e a função objetivo está vinculada aos parâmetros concentrados do quadripolo.

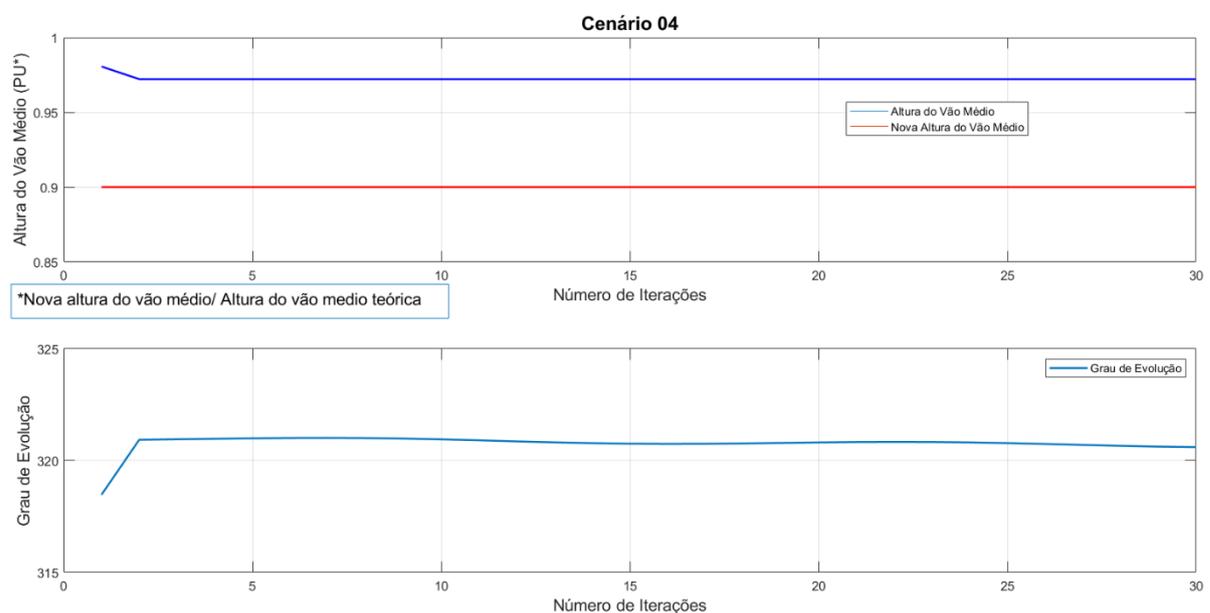


Figura 36 - Grau de evolução e variação na altura do vão médio - Cenário 04

4.3.1.5 Cenário 05 – Variações no comprimento da LT e altura do vão médio

No quinto cenário foi realizada a variação simultaneamente de dois parâmetros da LT. Dado que no caso real da LT as variações podem ocorrer de forma simultânea foram realizados testes para avaliar o comportamento do algoritmo desenvolvido neste cenário. Alterações simultâneas no comprimento do condutor e altura do vão médio podem ocorrer tipicamente durante a operação da LT ao considerar dilatação térmica longitudinal dos condutores. O resultado está apresentado na Tabela 16.

4.3.1.6 Cenário 06 – Variações no comprimento, vão médio e resistividade de solo da LT

No sexto cenário foi realizada a variação simultânea de três parâmetros da LT. Dado que no caso real da LT as variações podem ocorrer de forma simultânea foram realizados testes para avaliar o comportamento do algoritmo desenvolvido neste cenário. Neste cenário foram realizadas alterações no comprimento do condutor, altura do vão médio e resistividade do solo. O resultado está apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultado da simulação - Sexto cenário

	Z_p (Ω)	Z_n (Ω)	Z_{0m} (Ω)	eZ (%)
Z1	$3,22 + i48,50$	$3,54 + i53,43$	$3,25 + i53,32$	0,5792
Z0	$51,44 + i200,51$	$55,66 + i219,23$	$56,35 + i218,81$	0,3571
Y1	$i6,728e-04$	$i7,406 e-04$	$i7,407 e-04$	0,0135
Y0	$i4,401e-04$	$i4,877 e-04$	$i4,951 e-04$	1,5173

O algoritmo apresentou resultado satisfatório e ao final do rastreamento os erros foram inferiores a 1%, com exceção do parâmetro Y0 que ao final apresentou erro de aproximadamente 1,52%. Adicionalmente, foram avaliados os valores finais dos parâmetros alterados ao final do processo iterativo.

A novo comprimento da LT estabelecido foi de 154,11km, a nova altura do vão médio foi de 8,78m e a resistividade do solo foi de 900 Ω .m. Ao final do rastreamento o algoritmo identificou o valor de 153,72km, a altura do vão médio foi de 9,02m e a resistividade do solo foi de 952 Ω .m. O grau de evolução ao final do rastreamento foi de aproximadamente 275. A Figuras 38 apresenta o grau de evolução e a evolução do rastreamento da altura do vão médio, comprimento de LT e a resistividade do solo. Destaca-se novamente a capacidade do otimizador de rastrear apenas os novos valores dos parâmetros concentrados de sequência do quadripolo.

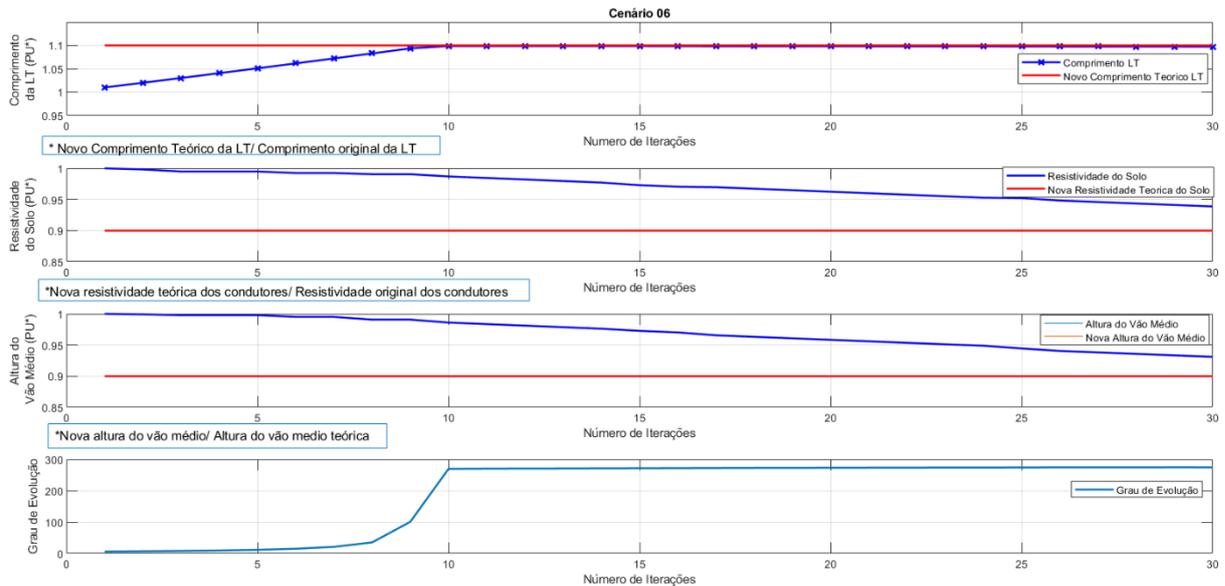


Figura 38 - Grau de evolução e variações na altura do vão médio, resistividade do solo e comprimento da LT - Caso 6

4.3.1.7 Cenário 07 – Variações diversas nos parâmetros da LT

No sétimo cenário foi realizada a variação simultânea dos quatro parâmetros da LT que foram estabelecidos como passíveis de mudança no capítulo 3. Desta forma, neste cenário, foram realizadas alterações no comprimento do condutor, altura do vão médio, resistividade do solo e resistência do condutor. O resultado está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultado da simulação - Sétimo cenário

	Z_p (Ω)	Z_n (Ω)	Z_m (Ω)	eZ (%)
Z1	$3,22 + i48,50$	$4,06 + i53,34$	$3,82 + i53,39$	0,4583
Z0	$51,44 + i200,51$	$57,05 + i218,79$	$54,59 + i223,95$	2,5282
Y1	$i6,728e-04$	$i7,416 e-04$	$i7,416 e-04$	0,0000
Y0	$i4,401e-04$	$i4,925 e-04$	$i4,963 e-04$	0,7716

O algoritmo apresentou resultado satisfatório e ao final do rastreamento os erros foram inferiores a 1%, com exceção do parâmetro Z0 que ao final apresentou erro de 2,52%. Adicionalmente foram avaliados os valores finais dos parâmetros alterados ao final do processo iterativo.

A novo comprimento da LT estabelecido foi de 154,11km, a nova altura do vão médio foi de 8,78m, a resistividade do solo foi de $900\Omega.m$ e a resistência do condutor foi de $0,0766 \Omega/km$. Ao final do rastreamento o algoritmo identificou o valor de 154,18km, a altura vão do

médio foi de 9,72m, resistividade do solo foi de 966 Ω .km e a resistência do condutor foi de 0,0776 Ω /km. O grau de evolução ao final do rastreamento foi de aproximadamente 253. A Figura 39 apresenta os resultados do cenário 7. Destaca-se que as diversas mudanças acarretaram num EVA muito baixo ao início do processo de otimização e, ao longo do processo, o mesmo foi aumentando até o critério de parada. Novamente o otimizador foi capaz de rastrear as mudanças nos parâmetros concentrados de sequência do quadripolo e a mesma afirmação não pode ser feita para o rastreamento dos parâmetros geométricos individualizados.

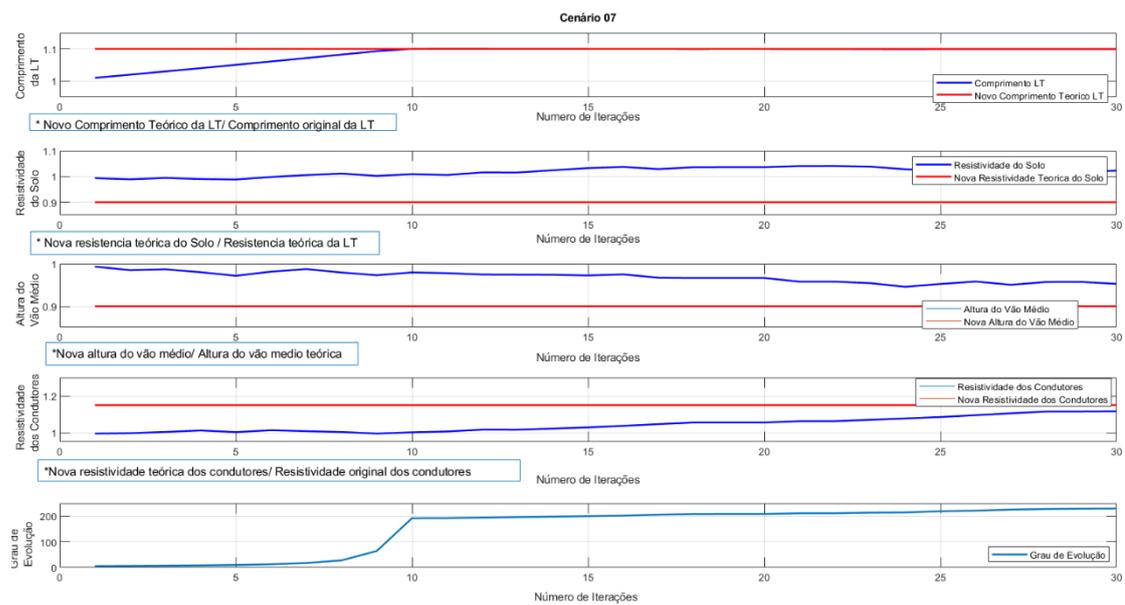


Figura 39 - Grau de evolução e variações na resistência do condutor, altura do vão médio, resistividade do solo e comprimento da LT encontrados - Caso 7

A Figura 40 apresenta a comparação do grau de evolução dos sete cenários estudados. Na Figura é possível perceber como cada mudança impacta no grau de evolução e a resposta do algoritmo para cada cenário. Nos cenários onde não há alteração no comprimento da linha de transmissão o grau de evolução ainda apresenta um valor inicial satisfatório indicado que não há grande alteração na igualdade apresentada na equação (29). No pior cenário, onde não há alteração no comprimento, o grau de evolução já se inicia com valor de 175 na primeira iteração.

Após o processo de 30 iterações em todos os cenários houve valor de grau de iteração superior a 150.

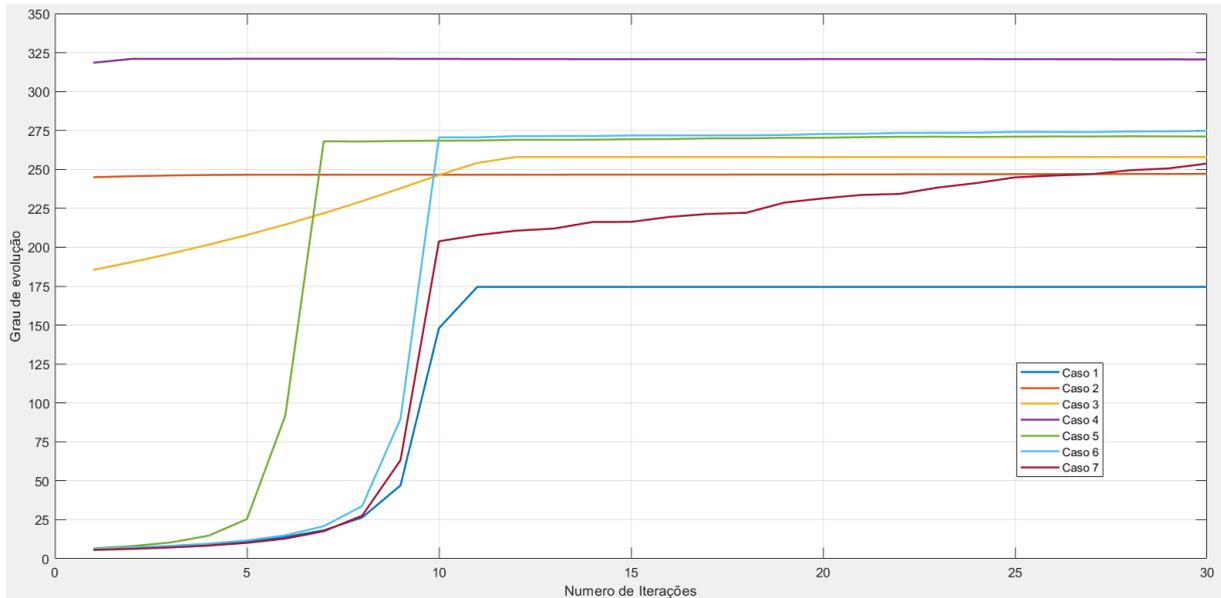


Figura 40 - Comparação Grau de Evolução.

Nas figuras de 41 a 44 estão representados os comportamentos no plano RX das variáveis Z1 e Z0 e no plano GB das variáveis Y1 e Y0. Estão representadas nas imagens os novos valores teóricos, calculados no ATP, para cada cenário representado e os valores rastreados no algoritmo. Através das imagens é possível verificar que os valores rastreados para as reatâncias foram semelhantes aos teóricos, porém há diferenças de até, aproximadamente, $0,4\Omega$ para os valores de resistência.

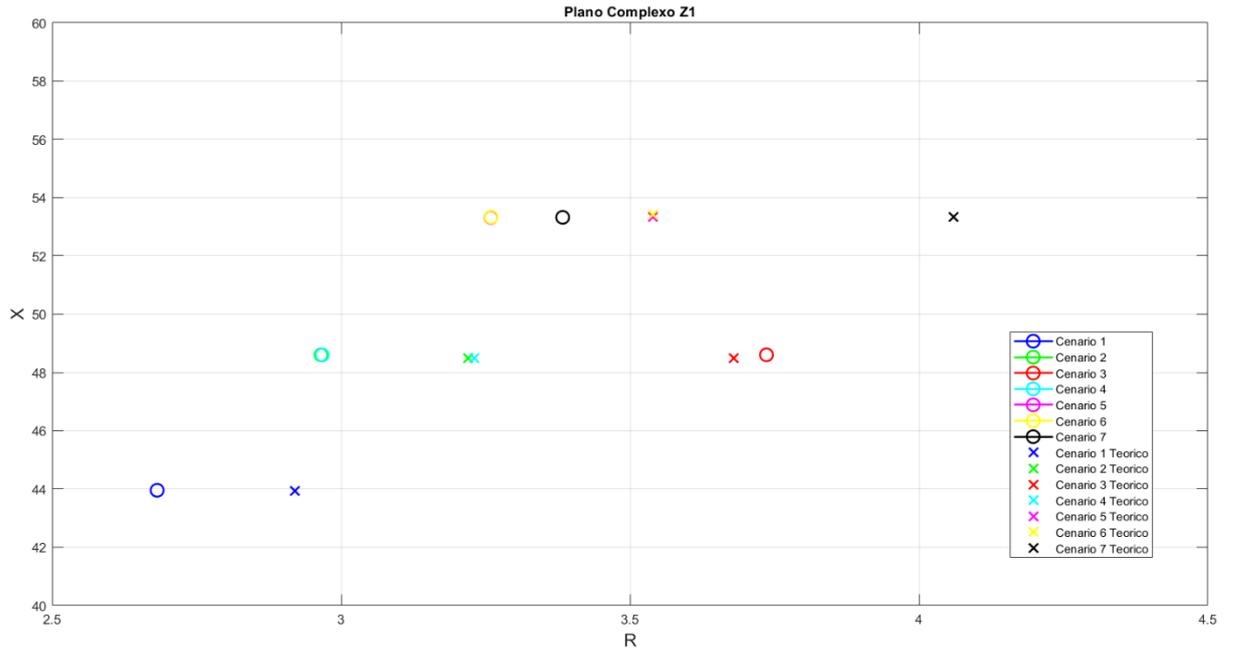


Figura 41 - Plano RX -Z1

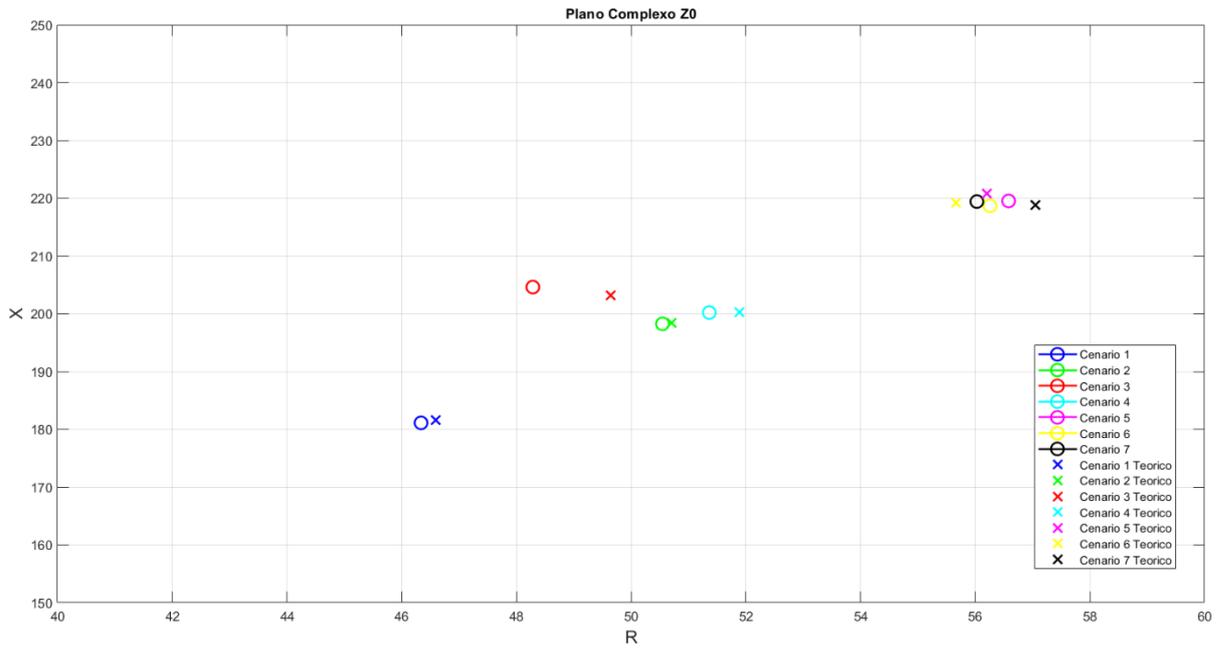


Figura 42 - Plano RX -Z0

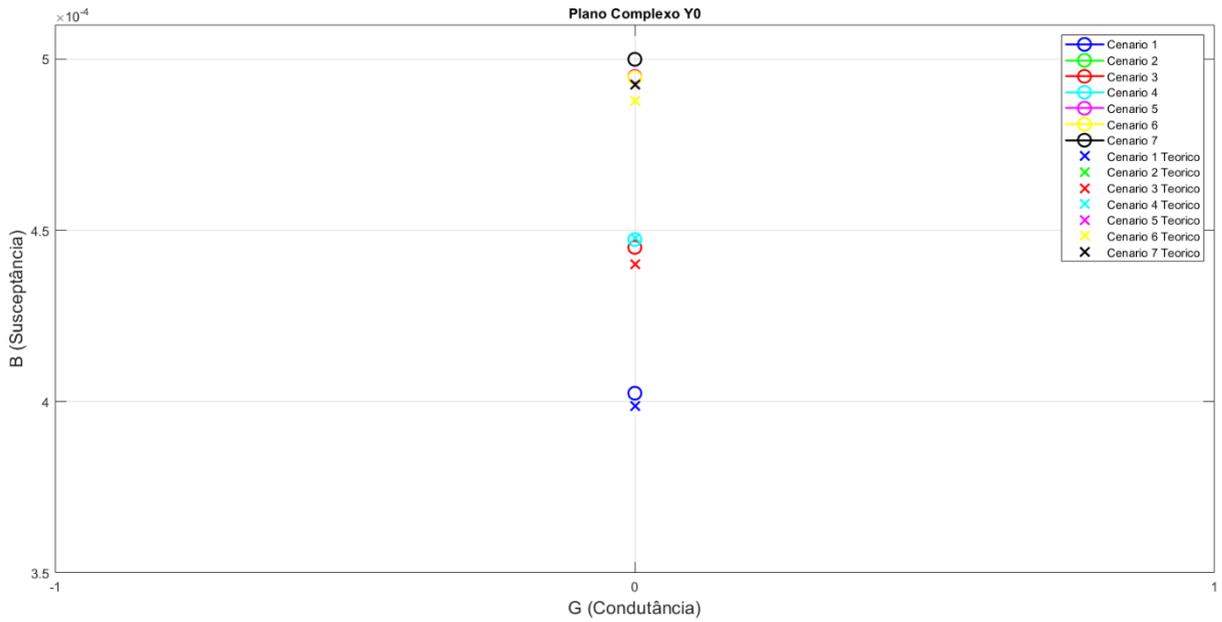


Figura 43 - Plano GB -Y1

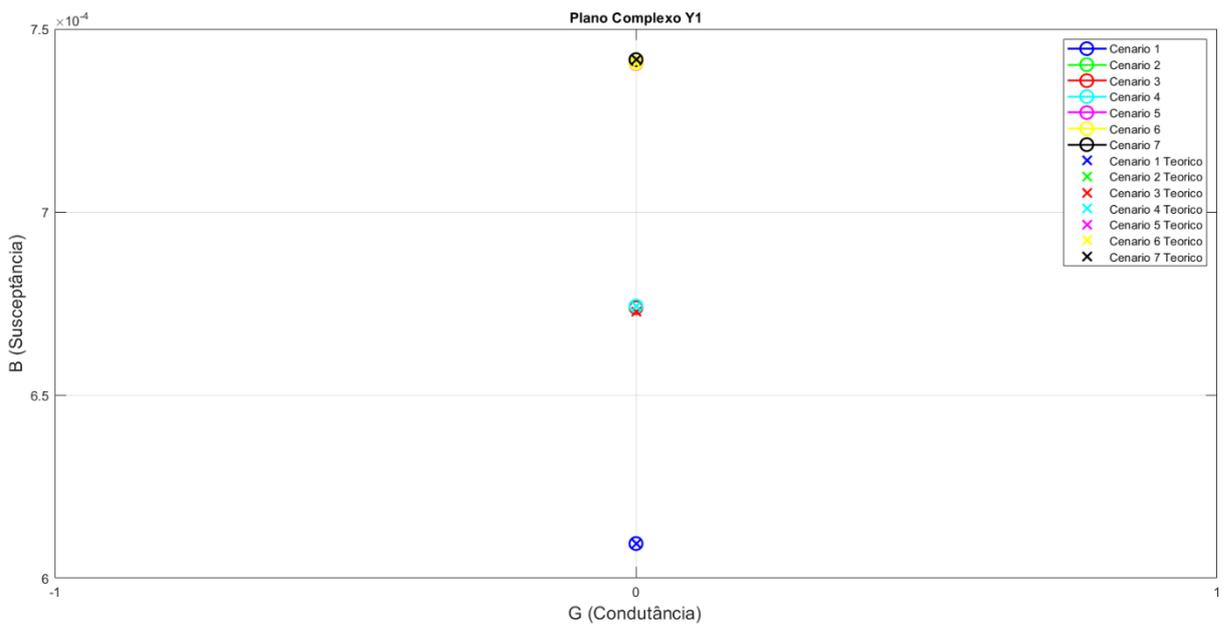


Figura 44 - Plano GB -Y0

De forma complementar, as análises e comparação entre os casos teóricos das figuras 45, 46, 47 e 48 apresentam a evolução ao longo do processo iterativo dos módulos dos parâmetros $Z1$, $Z0$, $Y1$ e $Y0$ ao longo do processo iterativo. É possível verificar que, de forma geral, a partir da 10ª iteração o valor otimizado dos parâmetros se aproximou dos valores teóricos obtidos através do ATP.

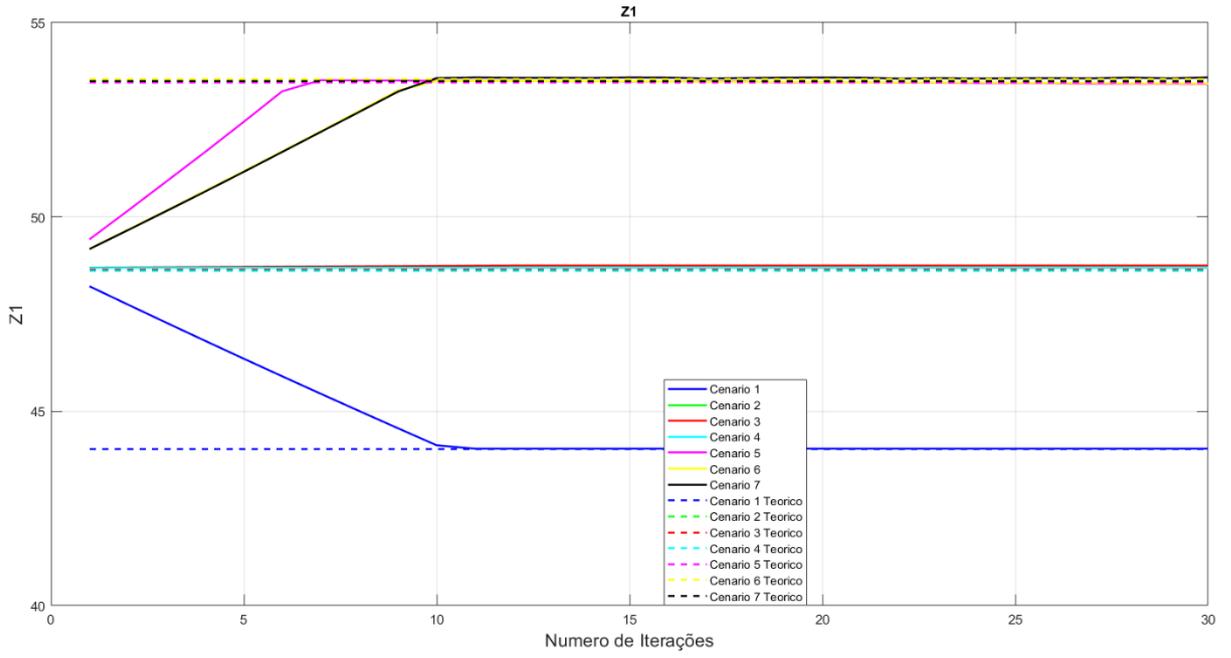


Figura 45 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro |Z1|

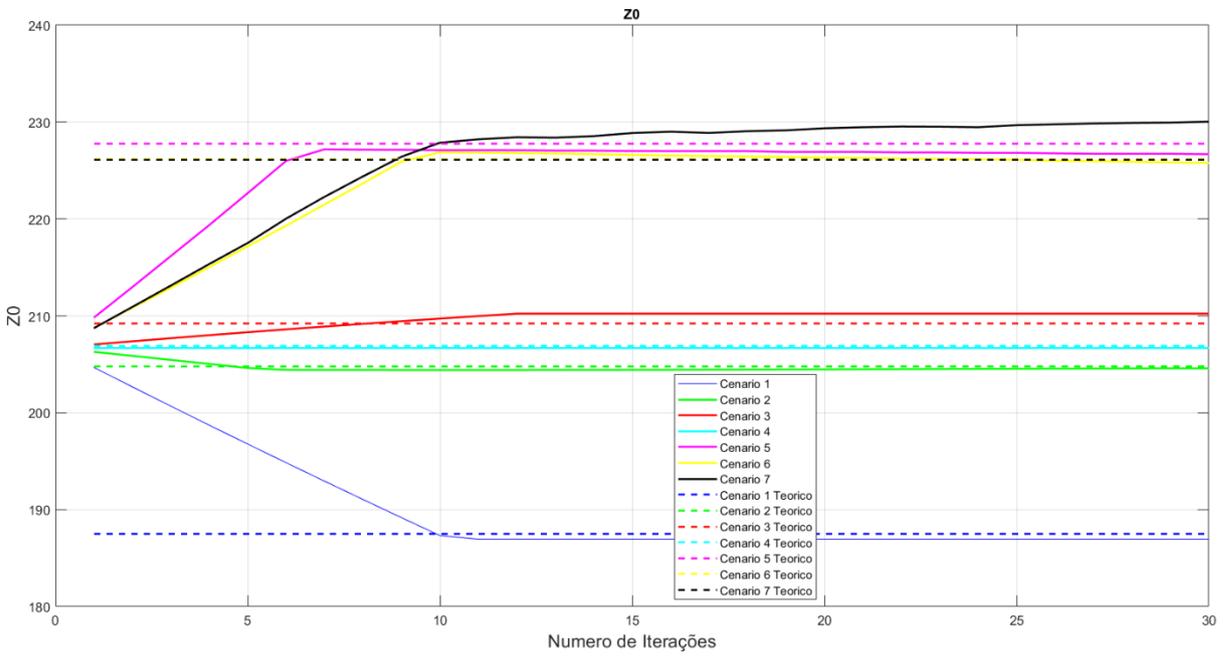


Figura 46 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro |Z0|

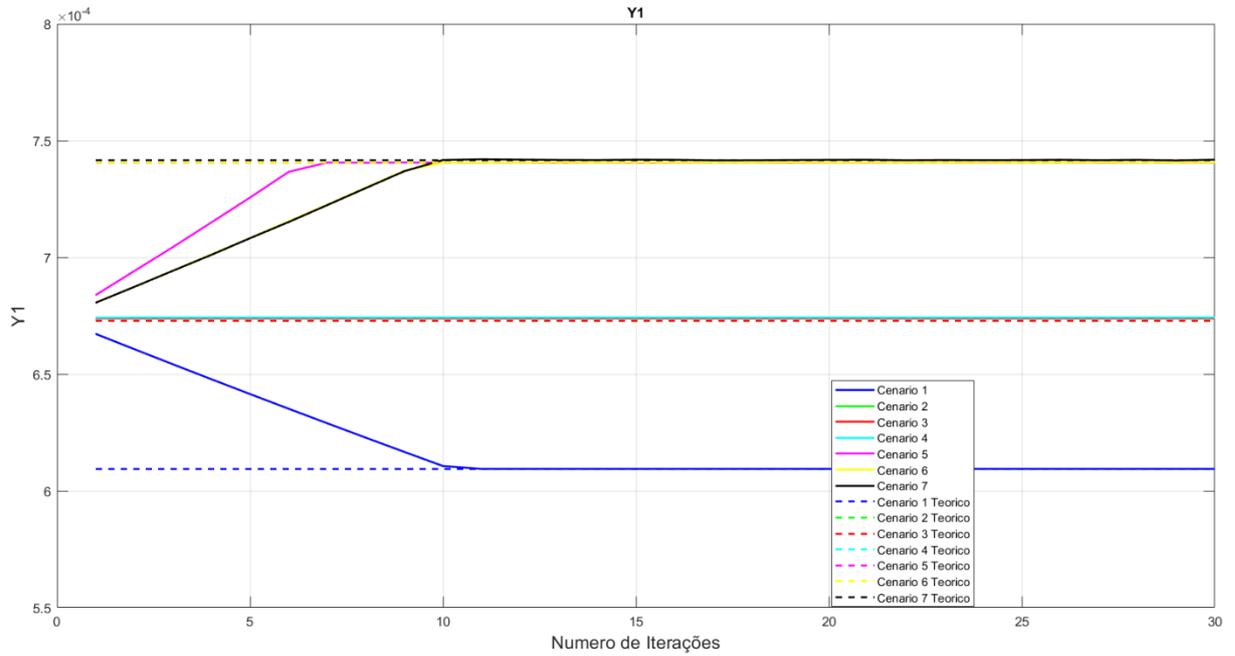


Figura 47 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro $|Y1|$

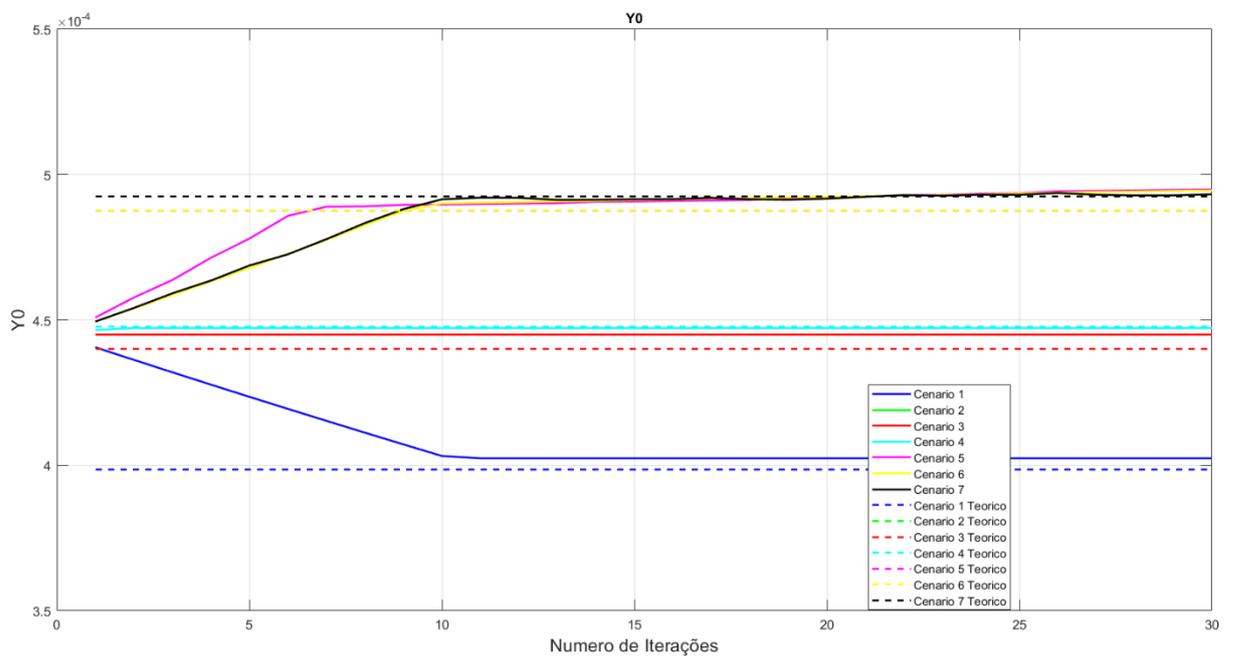


Figura 48 - Comparação entre casos - Otimização do parâmetro $|Y0|$

Os testes teóricos utilizando o ATP para aplicar variações controladas na LT permitiram concluir que o algoritmo de rastreamento de parâmetros concentrados é eficiente, pois conseguiu para todos os casos avaliados rastrear os novos parâmetros concentrados com poucas iterações no algoritmo de otimização. Permitiram também confirmar que o rastreamento dos

parâmetros geométricos individuais não é possível, apenas indicando a tendência das variações durante o rastreamento. Na sequência um conjunto de testes serão realizados considerando os registros reais de sinais de tensão e corrente de PMUs da LT considerada.

4.4 Análise dos parâmetros da LT sem otimização

Para entender o comportamento dos parâmetros da LT 500kV Estreito x Nova Ponte ao longo do tempo aplicou-se o otimizador desenvolvido com zero por cento de variação, em todos os parâmetros, durante um período de análise de 24h de operação típica da LT em estudo. Esta metodologia foi aplicada em duas amostras de dados de PMUs coletadas nos anos de 2021 e 2024. Para cada amostra coletada foi calculado o grau de evolução, sem realizar variações nos parâmetros, sendo possível verificar o EVA da linha de transmissão, em estudo, ao longo do tempo. Os resultados destas análises podem ser verificados na Figura 49. Ao não permitir que o otimizador busque os melhores parâmetros concentrados para representar a LT, o quadripolo fixo obtido pelos parâmetros de projeto será avaliado através do EVA com o intuito de confirmar que variações ocorrem durante o período de operação da LT.

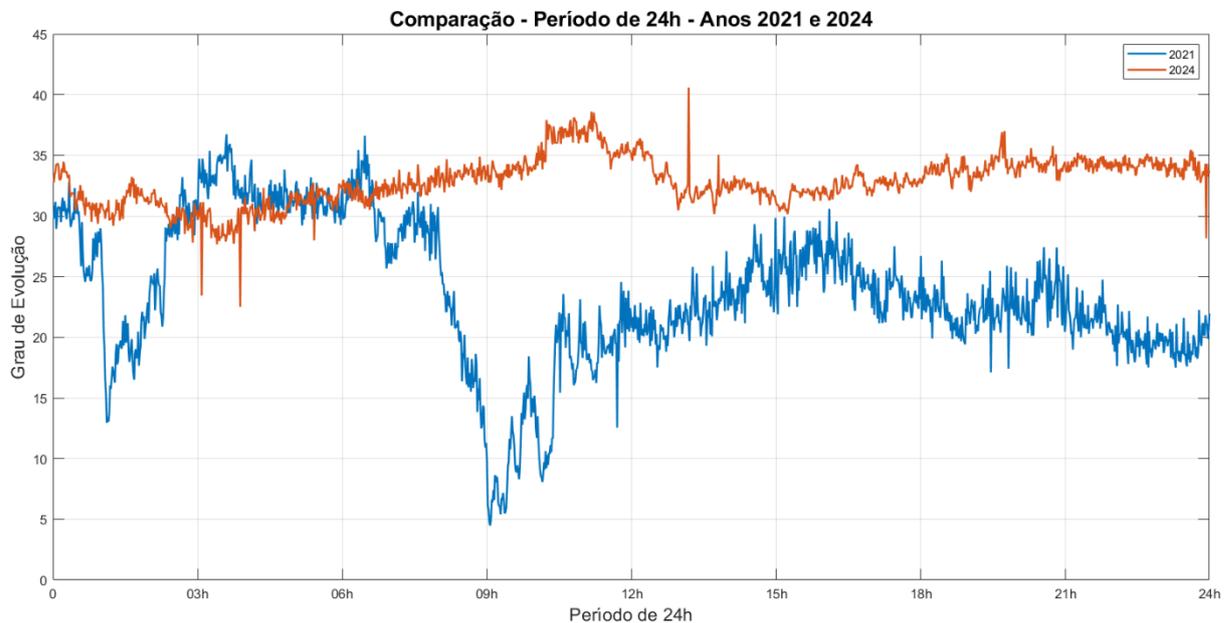


Figura 49 - Grau de evolução LT - sem otimização - Anos de 2021 e 2024

Ao não otimizar os parâmetros da LT deixando-os constantes e iguais ao projeto, verifica-se, primeiro, que a média do grau de evolução *Eva* durante o período de 24h foi de 23,68 para o caso 2021 e de 32,84 para o caso 2024. Esses resultados médios sugerem que a modelagem com valores de projeto aplicada para a linha de transmissão não está distante do modelo real da LT.

Segundo, confirma-se a premissa apresentada para o desenvolvimento do otimizador, no qual verifica-se que ao longo das 24h de análise o *Eva* sofreu variações significativas. Ou seja, os parâmetros reais da LT durante a operação podem sofrer alterações em comparação aos parâmetros de projeto, conseqüentemente, refletindo no comportamento das relações entre tensões e correntes de cada terminal da LT.

As variações do EVA do quadripolo de projeto ao longo de 24h registradas em anos e dias consideravelmente distintos confirmam que o desempenho elétrico da LT é diferente ao longo do tempo. Supõem-se que essas diferenças são o resultado de um grande e complexo conjunto de condições aleatórias impostas a LT durante sua operação, tais como temperatura ambiente, carregamento dos condutores, umidade do solo, entre outros. A proposta do otimizador é exatamente conseguir rastrear o impacto dessas condições aleatórias no quadripolo da LT e, conseqüentemente, rastrear ao longo da operação da LT o quadripolo que melhor represente cada momento específico de operação. Espera-se na seqüência que ao habilitar a busca do otimizador, a curva do EVA vá apresentar valores superiores e quadripolos mais representativos do desempenho elétrico da LT ao longo do tempo.

4.4.1 Otimizando os Casos Apresentados

Nesta seção será realizada a otimização dos parâmetros apresentados da LT 500kV Nova Ponte x Itumbiara nos casos 2021 e 2024. Para otimização dos casos será permitida variação nos parâmetros apresentados no capítulo 3 como possíveis de variação que são o comprimento, altura do vão médio, resistência do condutor e resistividade do solo. Nesta seção os resultados estarão divididos entre os resultados obtidos com as medições realizadas em 2021 e 2024.

4.4.1.1 Otimização – Medições 2021

A Figura 50 apresenta o grau de evolução da LT 500kV Estreito x Nova Ponte para um registro de 24h de coleta. Para realização do trabalho abaixo foram utilizadas amostras de PMU com intervalo de 1 minuto. Em azul está representado o EVA obtido sem realizar qualquer tipo de otimização, ou seja, com os parâmetros iguais aos de projeto. Em vermelho, o EVA, obtido após otimização dos parâmetros através do rastreamento das variações realizadas pelo otimizador proposto.

Para o caso em azul, podem ser observadas variações significativas corroborando com a premissa que há variações nos parâmetros da LT ao longo do tempo. Entretanto, para o caso em vermelho, verifica-se que o EVA ficou maior e sofreu menos variações ao longo do período de análise. Tais resultados demonstram a capacidade de rastreamento das variações dos parâmetros da LT ao longo do tempo pelo otimizador proposto.

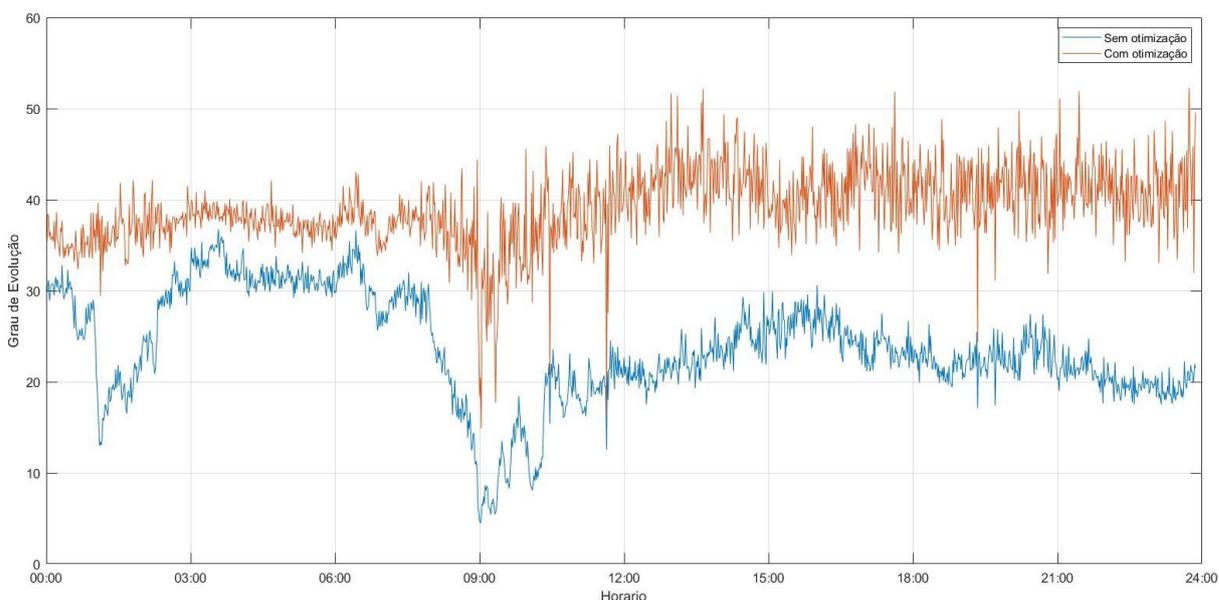


Figura 50 - Grau de Evolução – Comparação Sistema com e sem otimização

A Figura 51 apresenta comparação do módulo do parâmetro concentrado Z1 para os cenários da LT com e sem otimização. Para o cenário sem otimização o módulo da impedância Z1 é representado por uma linha reta. Para o cenário da LT otimizada o módulo da impedância Z1 da LT apresenta variações ao longo do período de 24h estudado conforme representado pela linha azul.

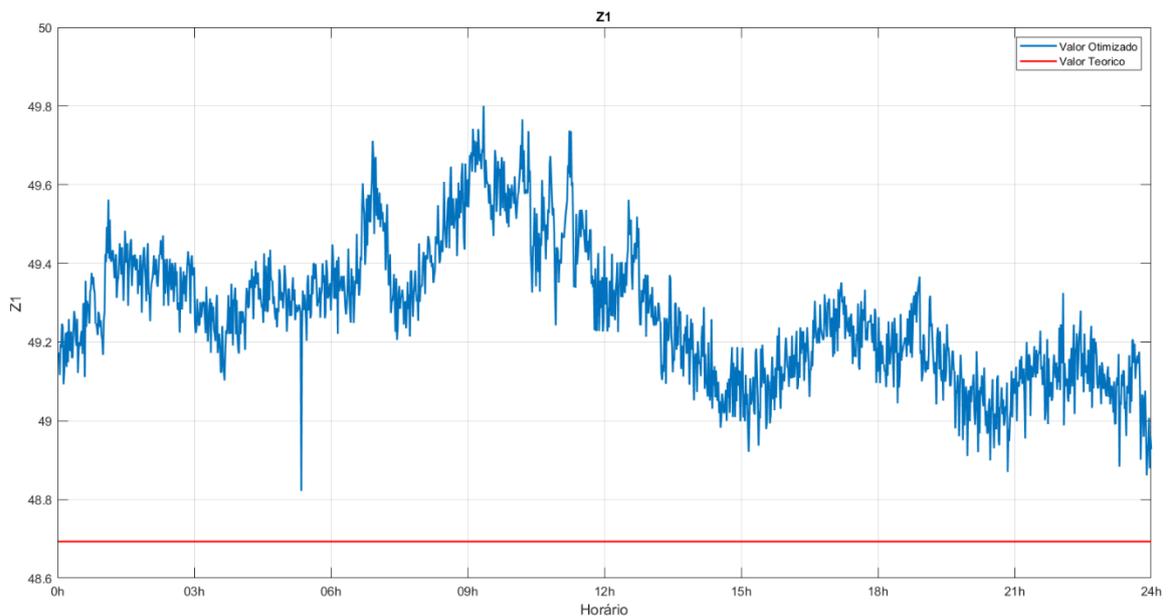


Figura 51 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $|Z1|$ da LT em ohms

Os resultados obtidos de rastreamento dos parâmetros concentrados da LT durante o período registrado permitem apenas a conclusão de que o algoritmo rastreia valores diferentes ao valor teórico. A melhoria do EVA durante o processo de otimização resultou em parâmetros concentrados da LT que confirmam os melhores quadripolos ao longo do tempo. Supõe-se com isso e os resultados obtidos com os testes teóricos no ATP que a LT sofre mudanças ao longo do tempo de operação e que o algoritmo proposto foi capaz de acompanhar as mudanças. Infelizmente, dado o caráter aleatório das possíveis variações dos parâmetros de uma LT real em operação, nunca será possível avaliar se o resultado do rastreamento está correto ou não. Essa conclusão limitante sugere a necessidade de avaliar os resultados obtidos através de outros processos que utilizam como entrada os parâmetros concentrados da LT obtidos, por exemplo aplicações de localização de falta na qual pode ter o desempenho aprimorado com os dados rastreados ao longo da operação da LT.

Antes de avaliar os resultados aplicados a um localizador de falta, de forma semelhante, são representadas nas figuras 52, 53 e 54 os valores dos módulos dos parâmetros, teóricos e rastreados pelo algoritmo, dos parâmetros $Z0$, $Y1$ e $Y0$.

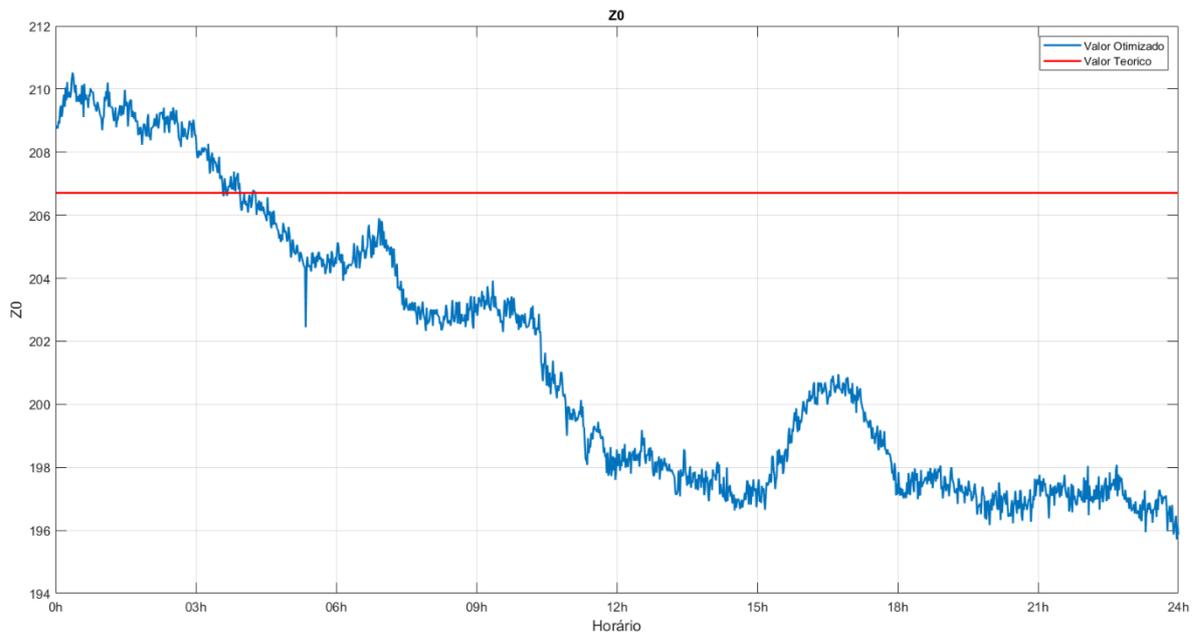


Figura 52 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $|Z_0|$ da LT em ohms

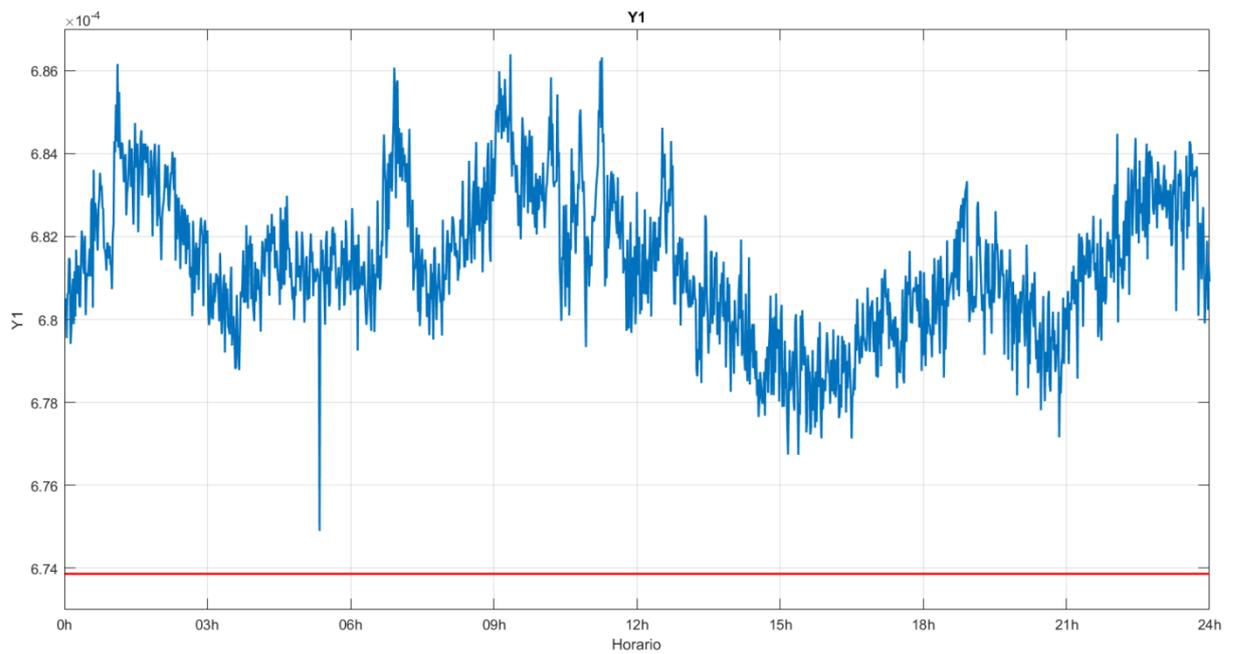


Figura 53 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $|Y_1|$ da LT em S

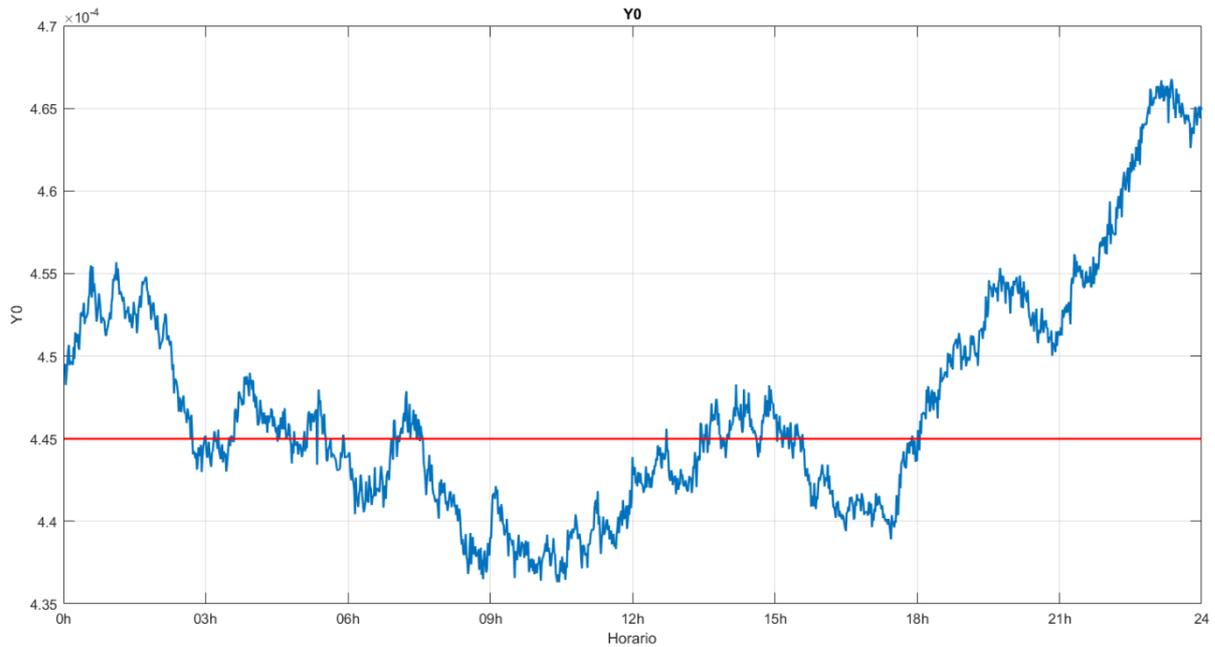


Figura 54 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Rastreamento de $|Y0|$ da LT em S

Com objetivo de identificar melhor o comportamento do EVA e dos valores de impedância e admitância rastreados são apresentadas nas figuras 55, 56, 57 e 58 as tensões e correntes da LT medidas durante o período em análise. Essas informações permitem melhor compreensão do comportamento da LT durante o período de rastreamento. Nas figuras 55 e 56 verificam-se valores de tensões equilibradas, diferença entre de tensão entre fases inferior a 1kV, confirmando um cenário típico de um sistema de transmissão em 500kV. Nas figuras 57 e 58 que apresentam as correntes da linha de transmissão é possível observar as mesmas equilibradas entre si durante todo o período de medição realizada através das PMUs. Também é possível observar grandes alterações nos valores da corrente e conseqüentemente na potência do sistema ao longo do período de estudo. Para a corrente $|I_{rf}|$ é possível observar um valor máximo de corrente de aproximadamente 500A nas primeiras horas de simulação e após 12h de coleta de dados são observados alguns períodos onde a corrente registrada fica próximo a zero, operando em uma faixa onde a corrente primária se encontra abaixo de 10% do valor nominal do TC (relação utilizada neste sistema é de 3000-5A). Por norma são permitidos erros superiores a 10% no transformador de corrente quando o TC se encontra nesta faixa de operação podendo impactar de maneira mais significativa no rastreamento do algoritmo.

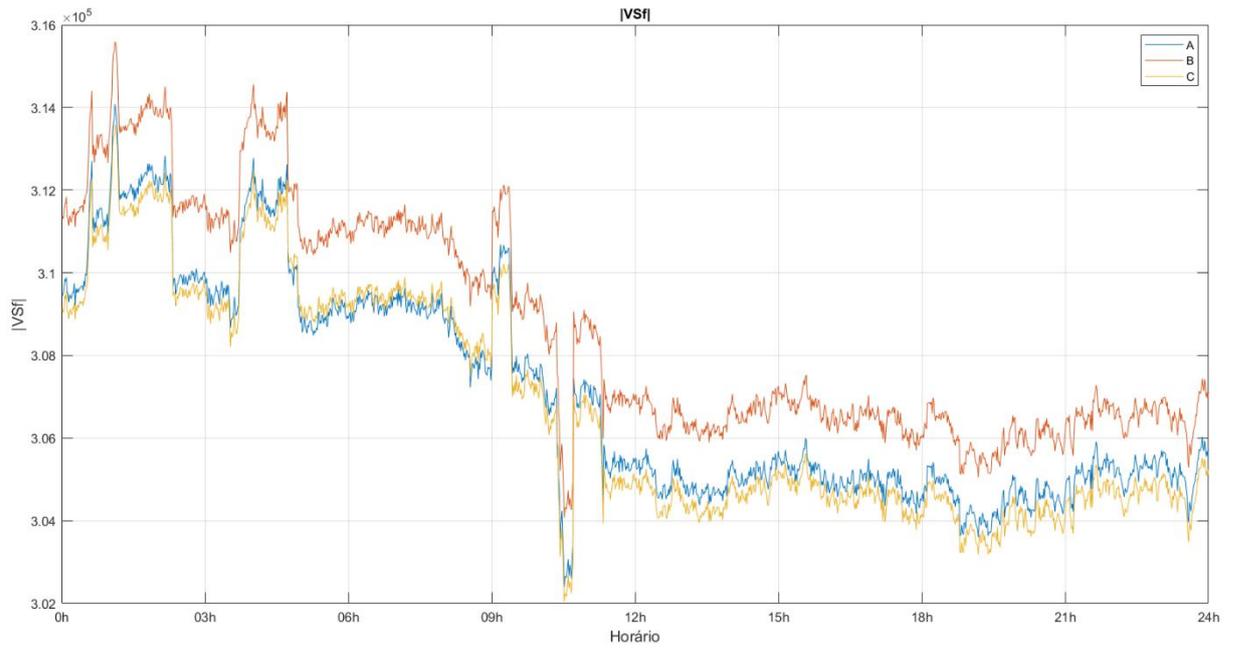


Figura 55 - Comportamento das tensões na LT - Período de 24h – $|V_{Sf}|$

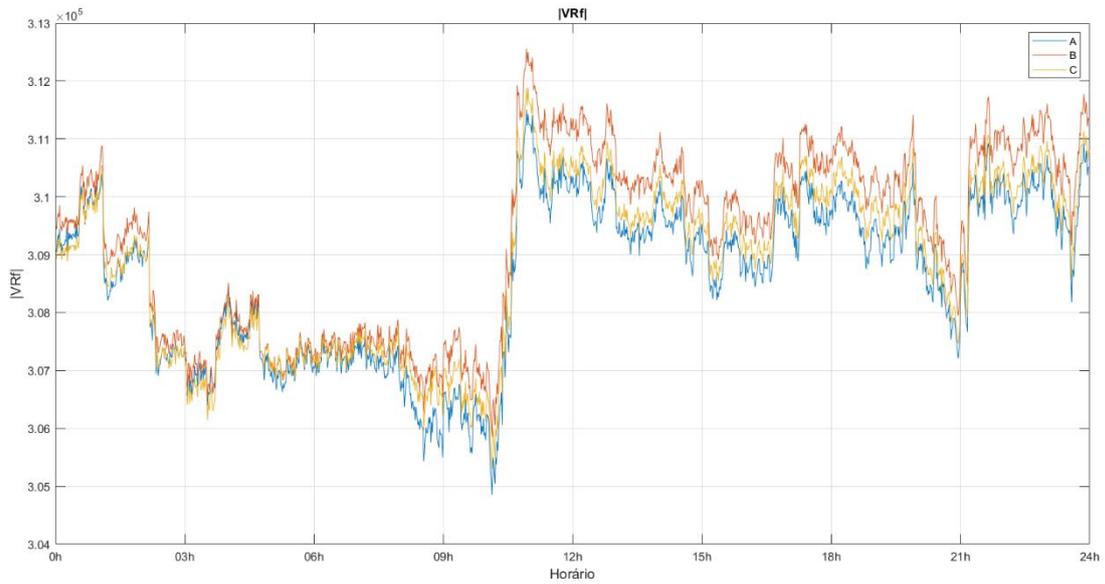


Figura 56 - Comportamento das tensões na LT - Período de 24h - $|V_{Rf}|$

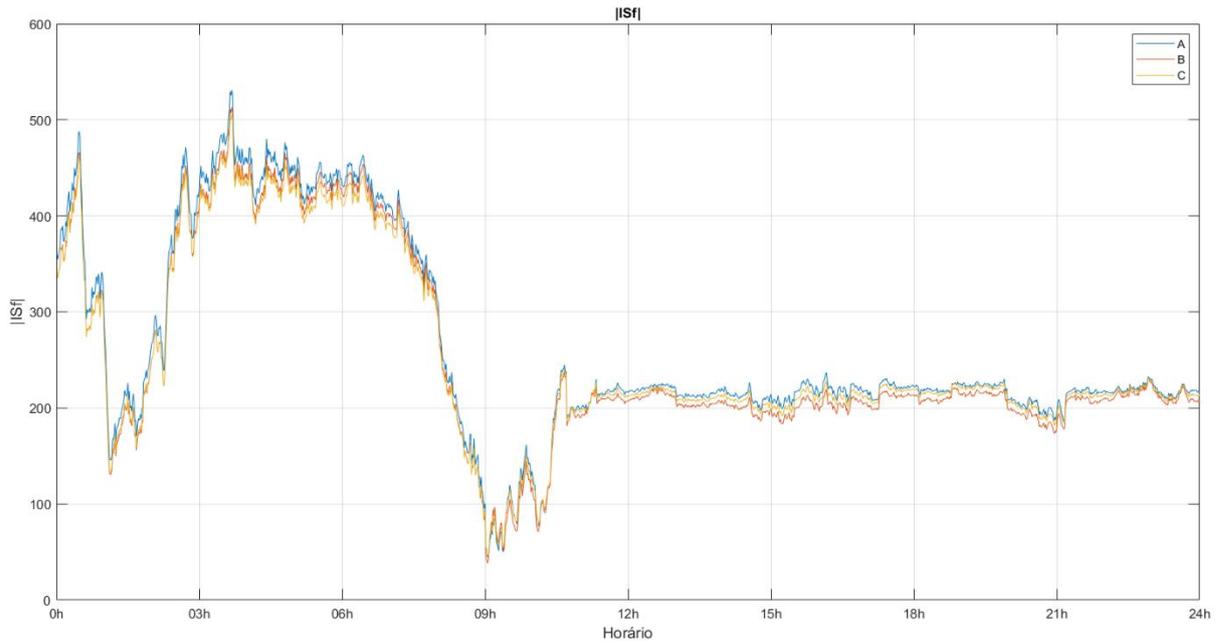


Figura 57 - Comportamento das correntes na LT - Período de 24h - $|ISf|$

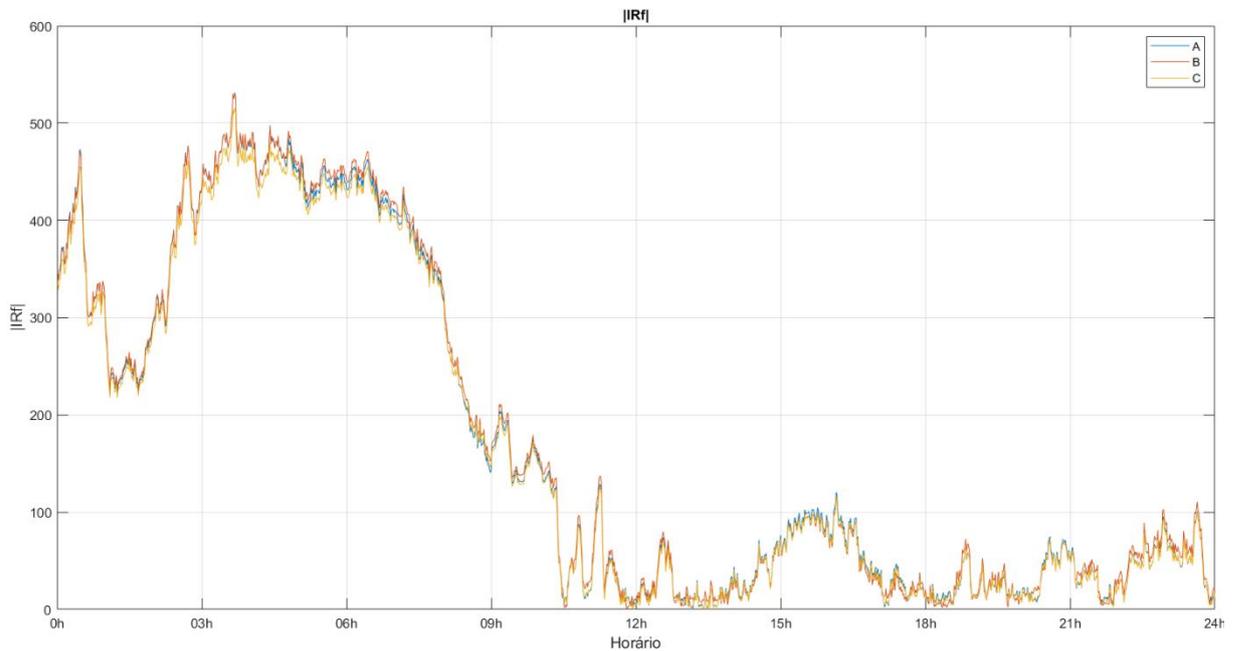


Figura 58 - Comportamento das correntes na LT - Período de 24h - $|IRf|$

Fica evidente com os dados de operação da LT registrados durante o período de 24h, que variações consideráveis no carregamento da LT ocorreram. Supõe-se que essas condições operacionais diversas podem ocasionar mudanças nos parâmetros da LT. Dados adversos que

supostamente também podem influenciar os parâmetros da LT rastreados não foram coletados, por exemplo, variações de temperatura e umidade.

Com objetivo de analisar melhor ao longo do tempo o comportamento do rastreamento do algoritmo proposto, para o cenário com os dados de 2021, foi realizado registro de 72h de dados de PMUs da LT 500kV Estreito x Nova Ponte. Neste mesmo cenário também foi realizada a otimização dos parâmetros da linha de transmissão em estudo e realizada a comparação entre os valores dos módulos de impedância e admitância teóricos e rastreados da linha de transmissão em estudo. O resultado do grau de evolução está apresentado na Figura 59. Em azul, o (EVA) obtido sem realizar qualquer otimização, ou seja apenas parâmetros de projeto. Em vermelho, o (EVA) obtido após otimização dos parâmetros através do rastreamento das variações realizado pelo otimizados proposto.

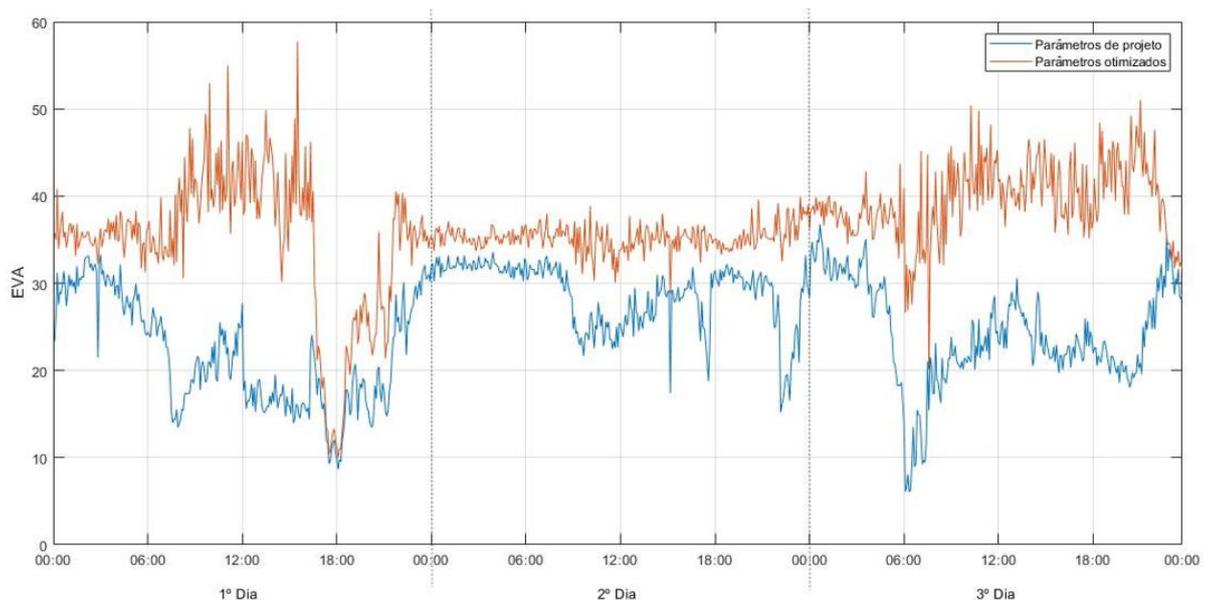


Figura 59 - Grau de evolução - Período de 72h - Dados com o e sem otimização

Nas figuras 60, 61, 62 e 63 é possível observar os valores dos módulos das impedâncias e admitâncias teóricos e otimizados da LT em estudo para o período de 72h. De forma semelhante os valores de Z_1 e Y_1 apresentam um valor mais oscilatório em torno de um valor médio indicando uma maior estabilidade destes valores. Neste cenário de 72h os valores de impedância Z_0 apresentaram uma estabilidade ao longo de, aproximadamente, 54h de simulação depois o valor apresentou uma queda acentuada indicando uma possível dificuldade do algoritmo em rastrear o valor de impedância Z_0 . A dificuldade é apontada como

consequência do equilíbrio do sistema em condição operacional que, por consequência, permitem níveis muito baixos para os sinais de tensão e corrente em sequência zero. Acredita-se que esses valores reduzidos combinados aos erros de medição da PMU resultam em piores desempenhos para os parâmetros concentrados de sequência zero.

Com objetivo de identificar melhor o comportamento do EVA e dos valores de impedância e admitância foram apresentadas nas figuras 64, 65, 66 e 67 as tensões e correntes da LT durante o período em análise.

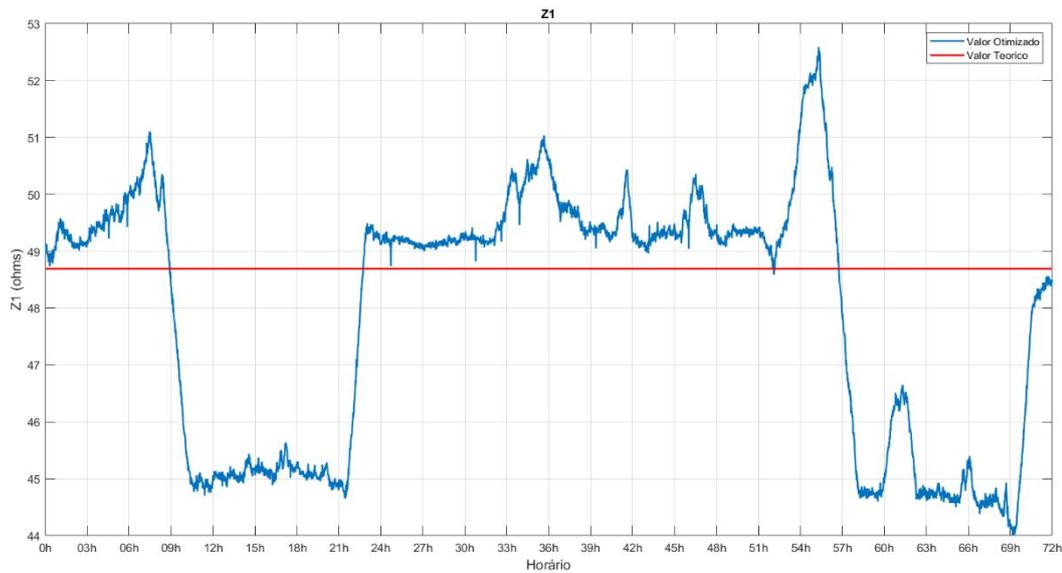


Figura 60 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $|Z1|$ da LT em ohms

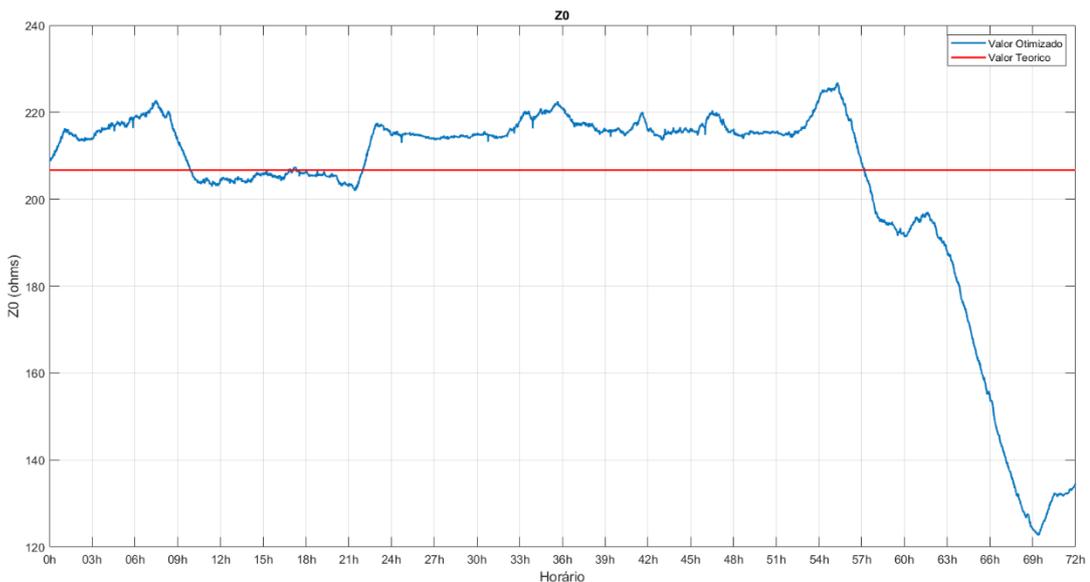


Figura 61 - - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $|Z0|$ da LT em ohms

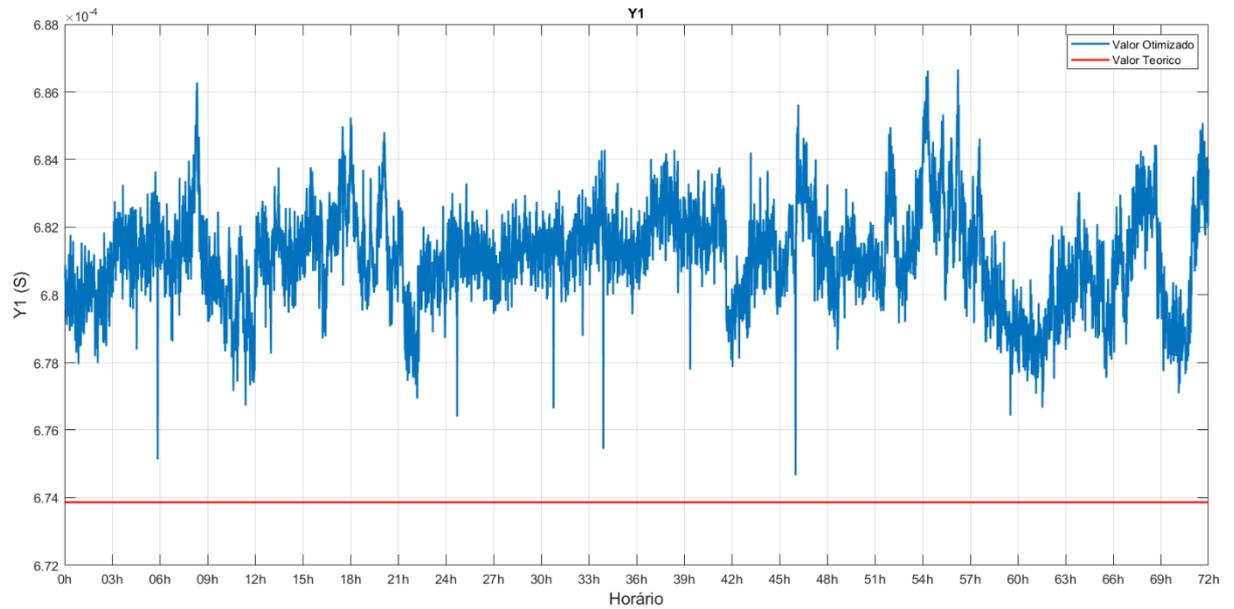


Figura 62 -- Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $|Y1|$ da LT em S

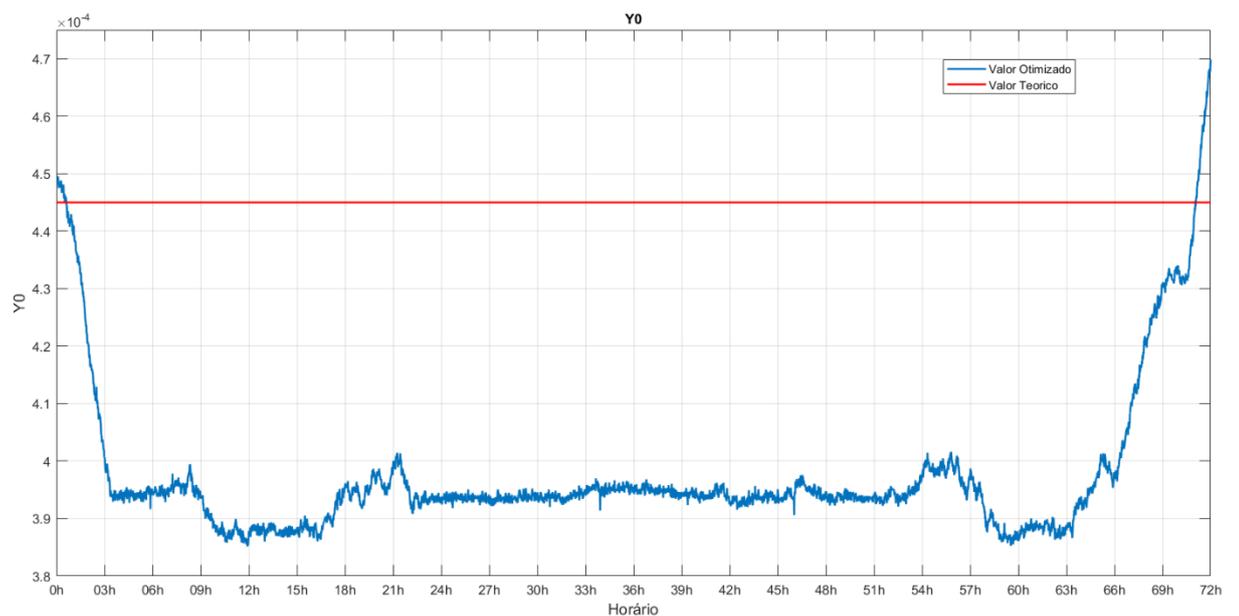


Figura 63 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $|Y0|$ da LT em S

As Figuras 66 e 67 apresentam as correntes da linha de transmissão. É possível observar as correntes da linha equilibradas entre si durante todo o período de simulação. Também é possível observar grandes alterações nos valores da corrente e conseqüentemente na potência do sistema ao longo do período de estudo. Para a corrente $|I_{rf}|$ é possível observar um valor máximo de corrente de aproximadamente 720A próximo ao período de 24h de simulação e após

57h de coleta de dados são observados alguns períodos onde a corrente registrada fica próximo a zero operando em uma faixa onde a corrente primaria se encontra abaixo de 10% do valor nominal do TC. Por norma são permitidos erros superiores a 10% no transformador de corrente quando o mesmo opera nesta faixa de valor podendo impactar de maneira mais significativa no rastreamento do algoritmo.

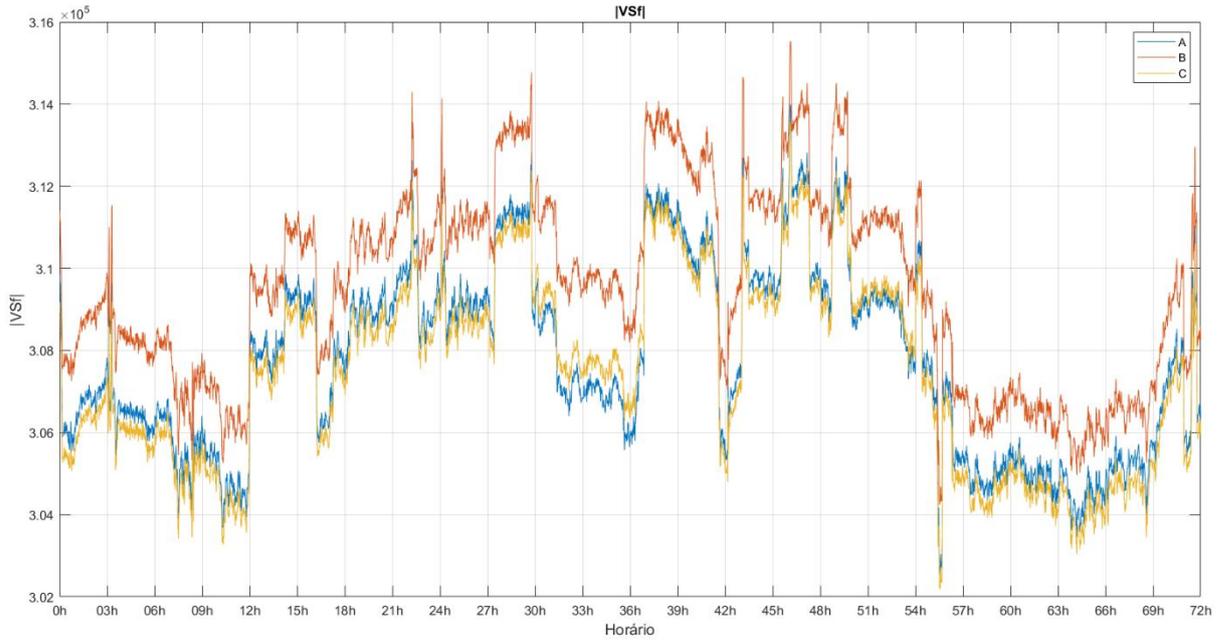


Figura 64 - Comportamento das tensões na LT - Período de 72h – |VSf|

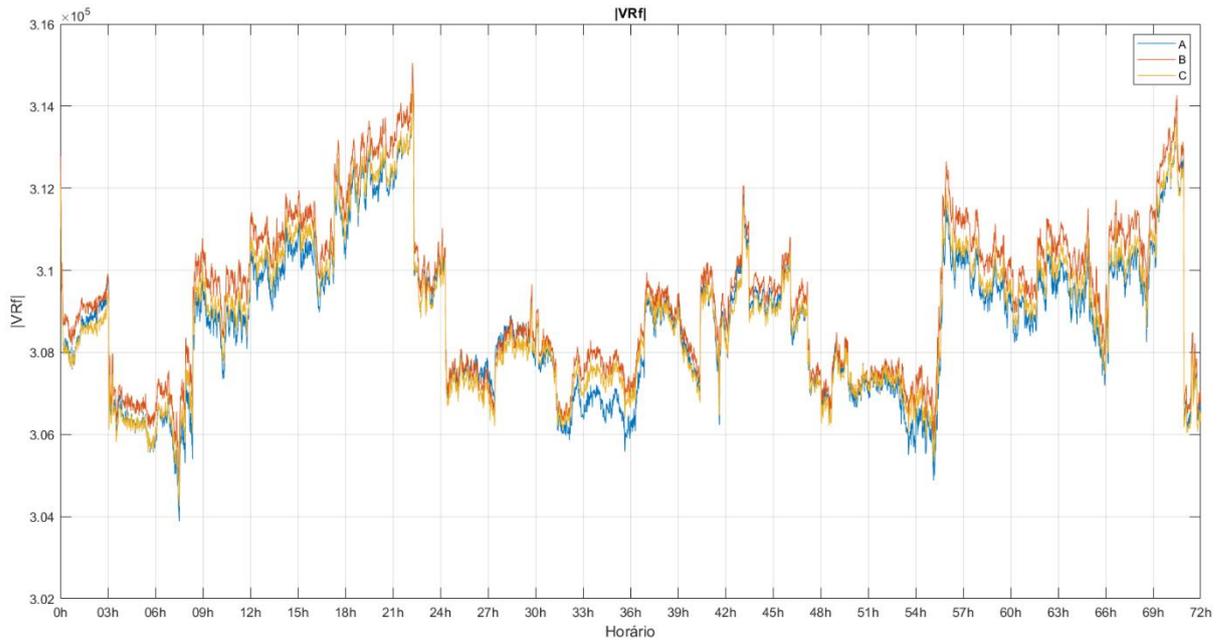


Figura 65 - Comportamento das tensões na LT - Período de 72h – |VRf|

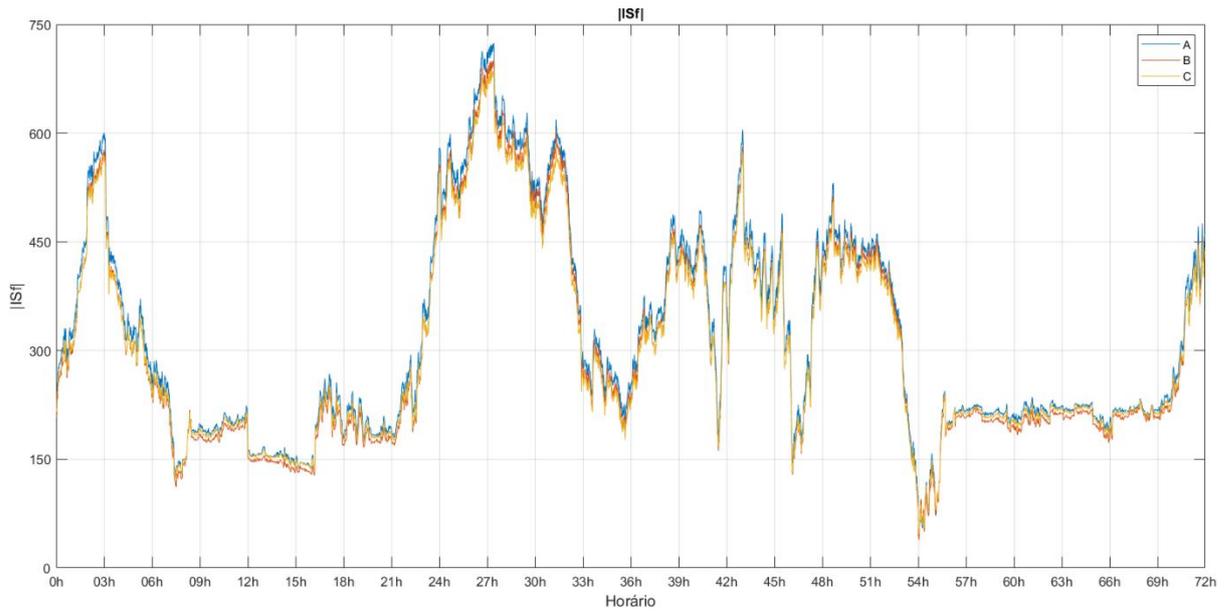


Figura 66 - Comportamento das correntes na LT - Período de 72h – |ISf|

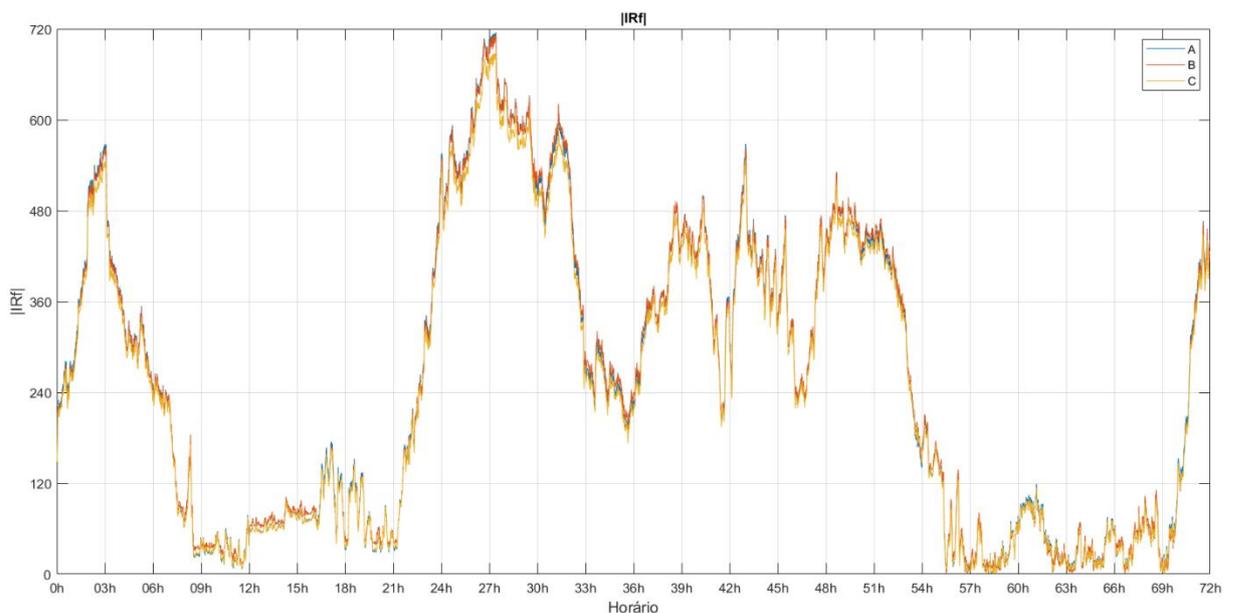


Figura 67 - Comportamento das correntes na LT - Período de 72h – |IRf|

Apesar das variações no fluxo de potência da LT, apresentada nas Figuras de 64 a 67, é possível observar na Figura 59 que para o caso sem otimização, em azul, podem ser observadas variações significativas no (EVA) ao considerar apenas os dados constantes e iguais ao projeto da LT. Entretanto, para o caso em vermelho, verifica-se que o (EVA) ficou maior e sofreu poucas variações. Tais resultados demonstram a capacidade de rastreamento das variações dos

parâmetros da LT ao longo do tempo pelo otimizador proposto mesmo diante das variações das grandezas elétricas do sistema.

4.4.1.2 Otimização – Medições | Ano de 2024

A Figura 68 apresenta o grau de evolução da LT 500kV Estreito x Nova Ponte para um registro de 24h de coleta realizada em junho de 2024. Para realização dos gráficos da Figura 68 foram utilizadas amostras de PMU com intervalo de 1 minuto. Em vermelho está representado o EVA obtido sem realizar qualquer tipo de otimização, ou seja, com os parâmetros iguais aos de projeto. Em azul, o EVA, obtido após otimização dos parâmetros através do rastreamento das variações realizadas pelo otimizador proposto.

Para o caso em vermelho, podem ser observadas variações significativas corroborando com a premissa que há variações nos parâmetros da LT ao longo do tempo. Entretanto, para o caso em azul, verifica-se que o (EVA) ficou maior e sofreu menos variações ao longo do período de análise. Tais resultados demonstram a capacidade de rastreamento das variações dos parâmetros da LT ao longo do tempo pelo otimizador proposto.

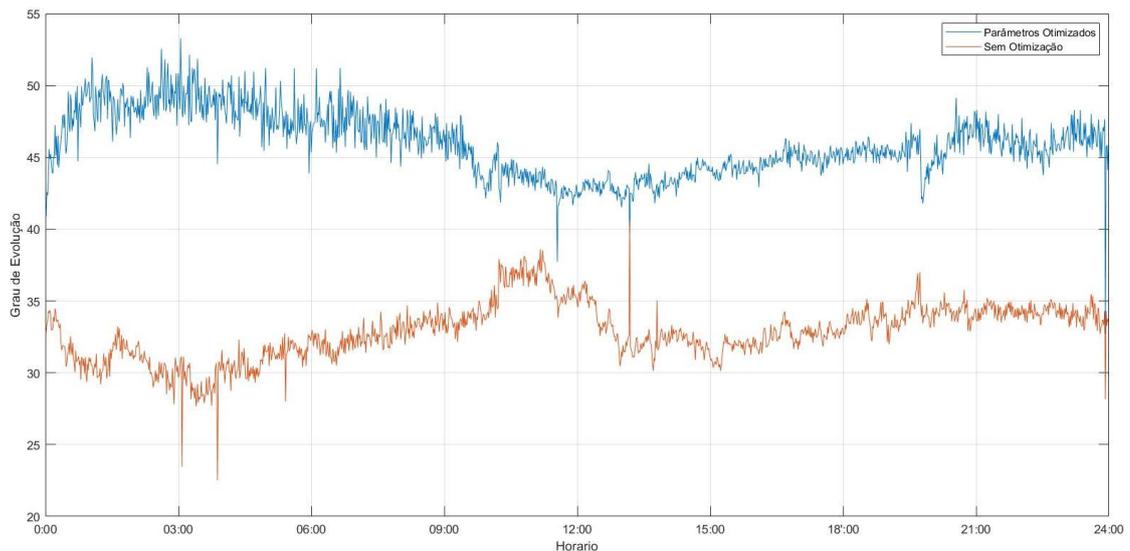


Figura 68 - Grau de Evolução – Comparação Sistema com o e sem otimização

As Figuras 69 a 72 apresentam comparação dos módulos dos parâmetros concentrados $Z1$, $Z0$, $Y1$ e $Y0$ comparando os valores teóricos da LT e os valores otimizados. Para o cenário sem otimização os valores são representados por uma linha reta, em vermelho. Diferente do cenário avaliado com os anos de 2021 para este estudo com os dados de 2024 é possível observar os valores de sequência positiva e zero mais estáveis ao longo do período de 24h de análise.

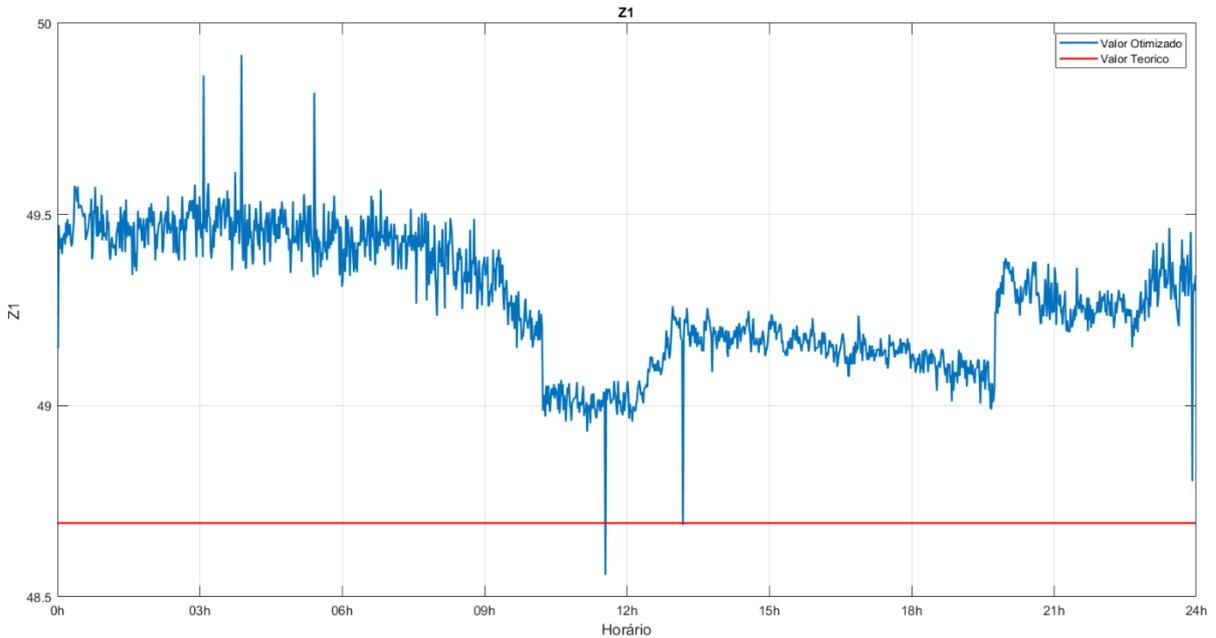


Figura 69 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 24h - Rastreamento de $|Z1|$ da LT em ohms

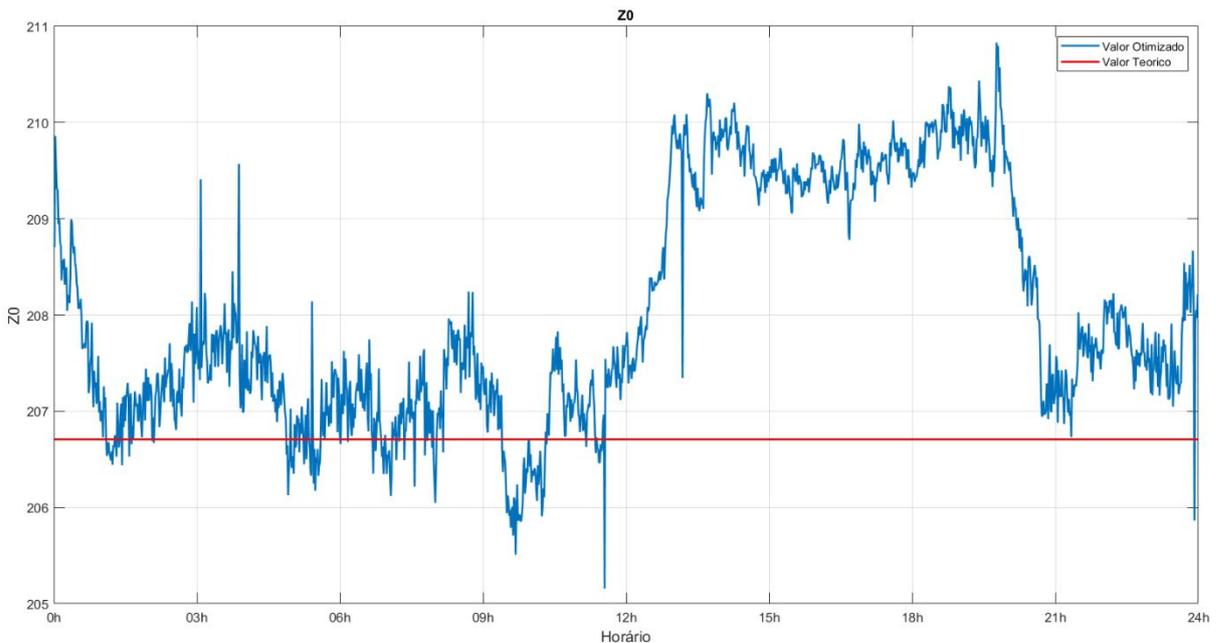


Figura 70 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 24h - Rastreamento de $|Z0|$ da LT em ohms

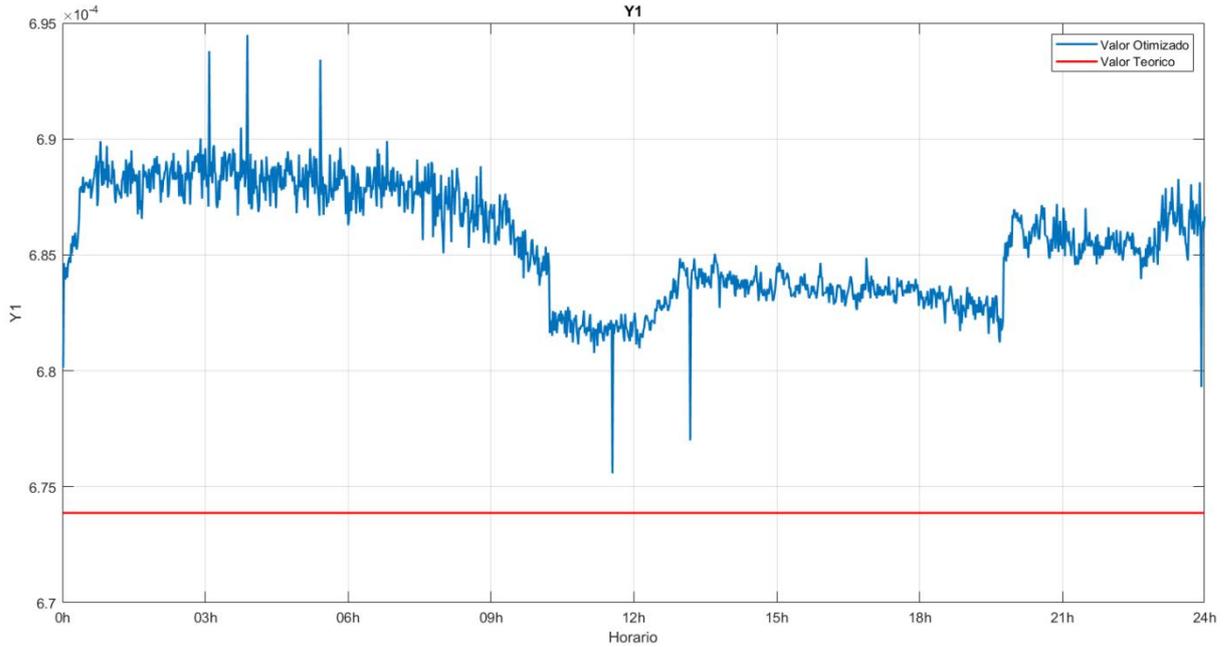


Figura 71 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 24h - Rastreamento de $|Y1|$ da LT em S

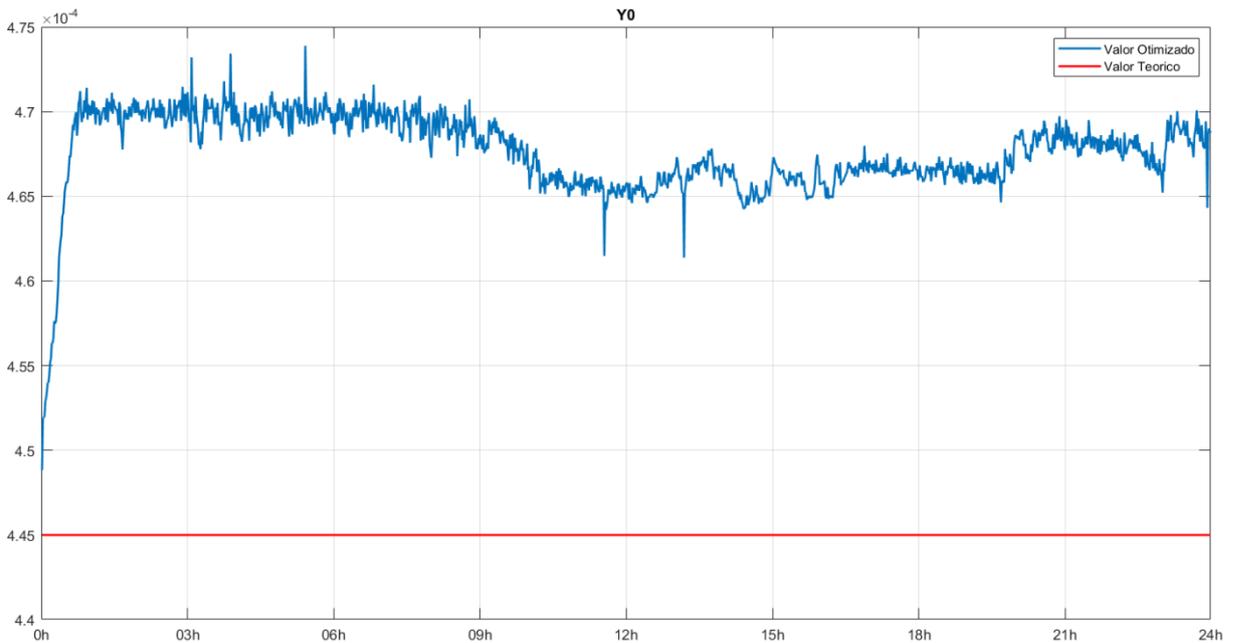


Figura 72 - Comparação Sistema com o e sem otimização – Período de 72h - Rastreamento de $|Y0|$ da LT em S

Nas Figuras 73 e 74 que apresentam as correntes da linha de transmissão é possível observar as correntes equilibradas entre si durante todo o período. Para este cenário é possível observar valores mais elevados de corrente ao longo do período de análise. Neste cenário também ocorreram significativas variações nas correntes ao longo do tempo, porém os valores permaneceram mais elevados dentro de uma faixa de valores entre aproximadamente 600A e

2.400A. Neste cenário com valores mais elevados de correntes foram observados valores mais estáveis das impedâncias e admitâncias ao longo do período de simulação. Para o caso da análise de caso utilizando o rastreamento de 72h com os dados de 2021 foi possível observar maior oscilação nos valores durante os períodos de menor corrente indicando melhor resultado do simulador durante cenário com carregamento da LT com corrente acima de 600A. Um ponto de análise neste cenário é o fato de que durante todo o período registrado correntes maiores que 10% do valor nominal. Nesta faixa de operação, por norma, são esperados menores erros de relação.

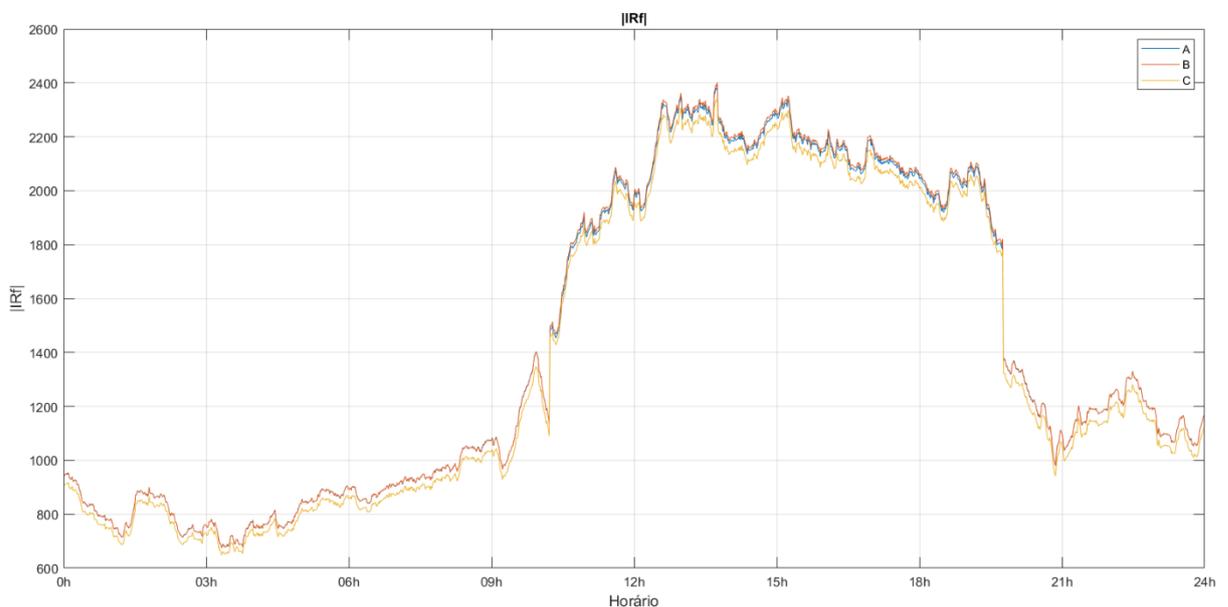


Figura 73 - Comportamento das correntes na LT - Período de 24h – |IRF|

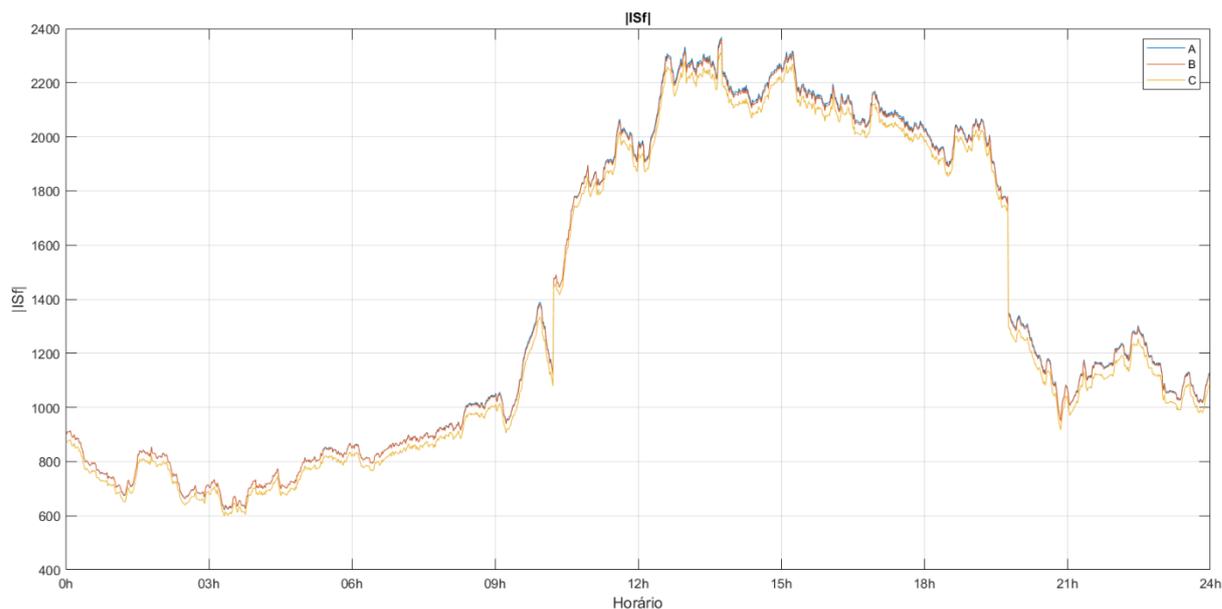


Figura 74 - Período de 72h - $|Z1|$

Matematicamente o aumento no grau de evolução indica que a combinação dos novos valores de $Z1$, $Z0$, $Y1$ e $Y0$ calculados representam uma melhor solução para o quadripolo da LT apresentado na equação (29). Porém, destaca-se que o quadripolo é a combinação dos elementos e mesmo que ocorra a limitação na variação dos parâmetros é possível que ocorram resultados inesperados para os parâmetros. Utilizando um sistema real de transmissão há uma real dificuldade de identificar se os novos valores de impedância e admitância encontrados efetivamente representam de forma mais fidedigna o modelo real da linha de transmissão em estudo. Porém, havendo um valor mais fidedigno do modelo da linha de transmissão são esperados melhores resultados nas aplicações e estudos que envolvem os modelos da linha em estudo.

Com objetivo de compreender melhor a dinâmica da variação da impedância rastreada pelo algoritmo foi realizada uma correlação entre a variação da impedância $|Z1|$, rastreada pelo algoritmo, com o carregamento da LT em estudo. A correlação foi realizada com base na janela de amostra de 72h obtida em 2021 apresentada no item 4.4.1.1. e os resultados estão apresentados nas Figuras 75 a 77.

Nas Figuras, de 75 a 77, é possível identificar alguns instantes onde há coincidência entre o aumento do carregamento da LT com o aumento do módulo de $Z1$. Porém de forma ampla não é possível estabelecer uma correlação direta entre o aumento do módulo $Z1$ e o carregamento da LT corroborando com a hipótese que a variação dos parâmetros da linha de

transmissão podem ser impactados por fatores ambientais, externos a LT, como presença de chuvas, ventos e temperatura ambiente.

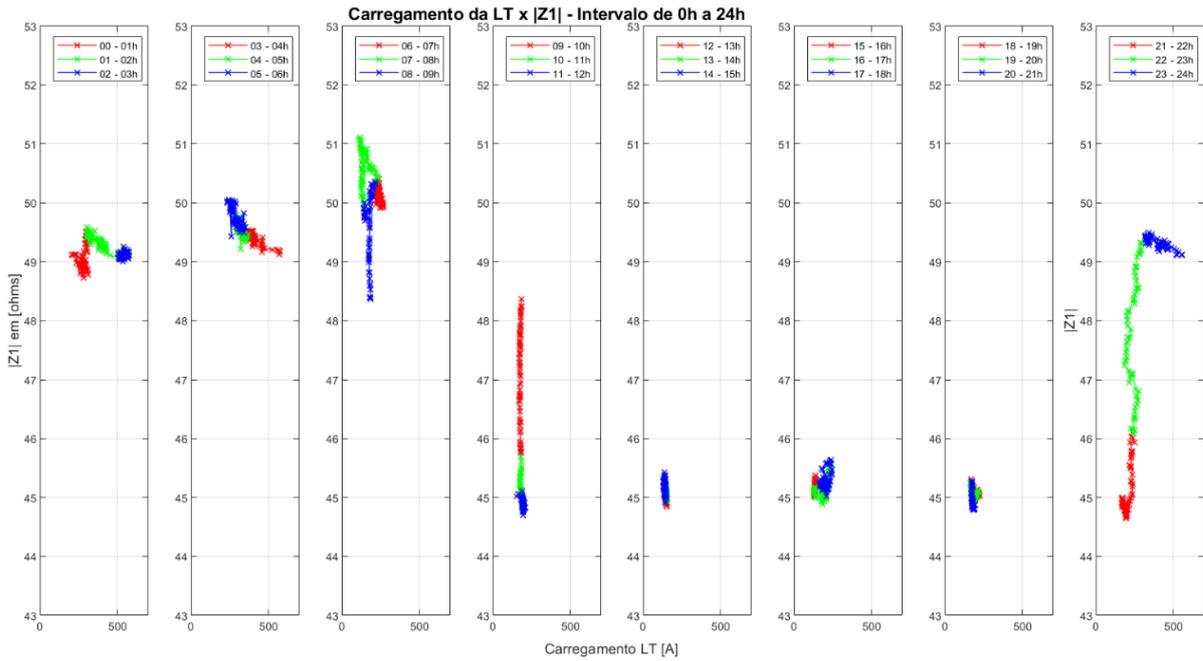


Figura 75 - Carregamento da LT x Impedância |Z1| - 0h a 24h

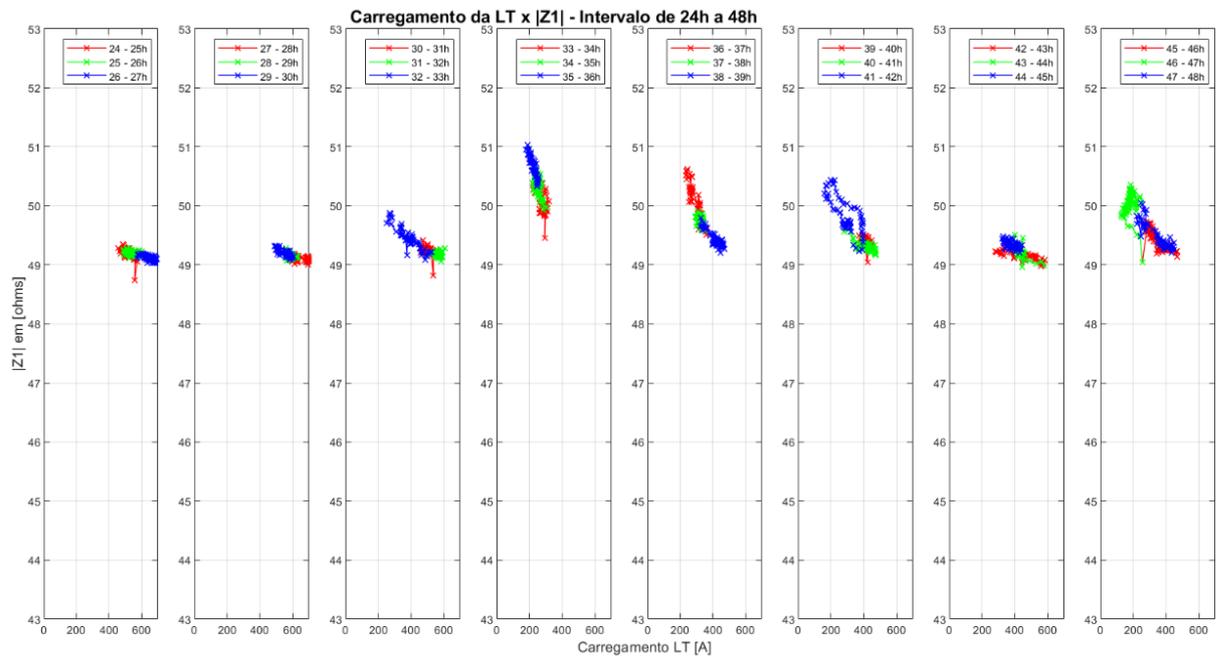


Figura 76 - - Carregamento da LT x Impedância |Z1| - 24h a 48h

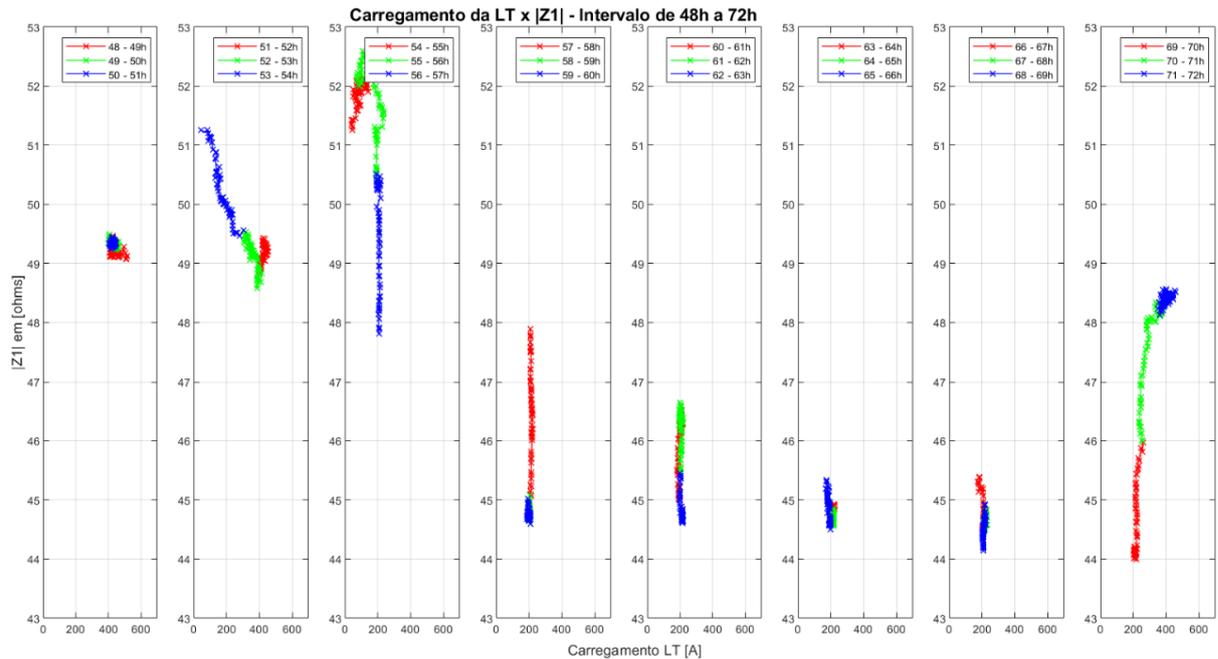


Figura 77 - - Carregamento da LT x Impedância $|Z1|$ - 48h a 72h

4.5 Validação do método utilizando dados de oscilografia e algoritmo de localização de falta

Uma típica aplicação utilizando os parâmetros de LTs são os cálculos de localização de faltas. Nestes cálculos além dos valores de tensão e corrente durante o instante de falta são utilizados os valores de impedância de sequência positiva e zero para realização do cálculo do ponto da falta. Desta forma nesta seção serão avaliados os resultados dos valores otimizados da LT em algoritmo de localização de falta com objetivo de avaliar se o mesmo irá apresentar melhores resultados no cálculo do ponto de localização da falta.

Os resultados obtidos pelo o otimizador não podem ser confirmados, pois através de dados reais da LT não é possível saber se para cada instante de tempo avaliado efetivamente os novos parâmetros identificados se aproximam dos valores reais da LT no instante da avaliação. Desta forma buscou-se demonstrar o seu bom desempenho de outra forma.

Partindo da premissa que quanto mais próximo dos valores reais os parâmetros concentrados da LT estiverem, melhores serão os desempenhos das diversas aplicações relacionadas a LT em estudo. Nesse sentido, com objetivo de validar a aplicação para casos

reais foram realizados testes onde, através da otimização dos parâmetros da LT, buscou-se o melhor cálculo da localização de falta.

Os métodos de localização de falta baseado em métodos de sequência negativa utilizam os parâmetros de sequência positiva e zero em estudo como dados de entrada para o cálculo do ponto de falta [33]. Desta forma, espera-se que quanto mais próximos os valores de impedância forem dos dados reais da LT mais preciso seja o resultado do algoritmo de localização de falta.

O localizador de falta aqui avaliado utiliza os registros dos sincrofasores da LT durante os segundos antes da ocorrência de uma falta, assim como os parâmetros concentrados da LT em estudo.

Partindo desta premissa foram realizados os seguintes testes com objetivo de realizar uma validação real do algoritmo proposto neste trabalho:

- Para o caso real de uma falta na linha de transmissão em estudo foram salvos os registros dos dados de PMU de ambos os terminais da LT nos cinco minutos antes da ocorrência da falta.
- Através dos dados de PMU foram calculados os parâmetros otimizados da linha de transmissão em estudo no instante anterior ao da falta.
- Através dos dados de impedância teóricos da LT e dos valores otimizados foi possível obter dois valores calculados de localização de falta sendo o primeiro cálculo realizado com os valores teóricos de projeto da LT e o segundo cálculo sendo realizado com os valores otimizados.

Com base nas informações é esperado que o cálculo realizado após otimização dos parâmetros da linha de transmissão esteja mais próximo do ponto real de falta identificado em campo pela equipe de manutenção.

A metodologia, citada acima, foi aplicada para o cálculo de localização de falta de duas ocorrências reais e identificadas pela equipe de campo, escolhidas aleatoriamente dos registros de ocorrências na LT 500kV Estreito x Nova Ponte.

4.5.1 Evento 1 – Desligamento ocorrido 13/07/2020

No dia 13/07/2020 houve desligamento automático devido à atuação da proteção de distância. O desligamento foi provocado por excremento de pássaro. A falta foi localizada pela equipe de manutenção a uma distância de 6,83km do terminal da subestação de Nova Ponte.

Para este evento foram coletados os dados de PMU instantes antes da falta e realizada otimização dos parâmetros. Os resultados podem ser vistos na Tabela 19.

Tabela 19 - Dados de impedância de LT - Antes e depois da otimização

	R1 (Ω)	X1 (Ω)	R0 (Ω)	X0 (Ω)
Teóricos	3,22	48,5	51,44,5	200,51
Otimizados	3,03	49,5	52,7	203,7

A Tabela 20 apresenta a comparação do desempenho do localizador de faltas e comparação dos resultados com e sem otimização dos parâmetros da LT.

Tabela 20 - Resultado -Localizador de faltas

Dados de projeto	Parâmetros Otimizados	Localização real	Erro distância de Projeto	Erro distância otimizada
7,76km	7,36km	6,83km	13,6%	7,76%

4.5.2 Evento 2 – Desligamento ocorrido 29/10/2020

No dia 29/10/2020 houve desligamento automático devido à atuação da proteção de distância. O desligamento foi provocado por queimada próxima a LT. A falta foi localizada pela equipe de manutenção a uma distância de 1,17km do terminal da subestação de Nova Ponte.

Para este evento foram coletados os dados de PMU instantes antes da falta e realizada otimização dos parâmetros. Os resultados podem ser vistos na Tabela 21.

Tabela 21 - Dados de impedância de LT - Antes e depois da otimização

	R1 (Ω)	X1(Ω)	R0	X0
Teóricos	3,22	48,5	51,44,5	200,51
Otimizados	2,41	49,1	56,94	194

A Tabela 22 apresenta a comparação do desempenho do localizador de faltas e comparação dos resultados com e sem otimização dos parâmetros da LT.

Tabela 22 - Resultado - Localizador de faltas

Dados de projeto	Parâmetros Otimizados	Localização real	Erro distância de Projeto	Erro distância otimizada
3,25km	2,44km	1,17km	177,8%	108,5%

Em ambos os registros ocorrem melhores desempenhos de localização de falta. A redução do erro de 177,8% para 108,5% sugere uma grande contribuição a utilização de parâmetros otimizados.

Mesmo não sendo possível confirmar a capacidade de rastreamento das variações dos parâmetros concentrados da LT em questão através do algoritmo proposto, o resultado do rastreamento aplicado a uma solução de localização de falta confirma a melhoria de desempenho. Ou seja, a otimização dos parâmetros concentrados da LT, mesmo não confirmada, resultou em melhores desempenhos na localização de falta.

4.6 Considerações Finais

No início deste capítulo foram apresentados testes teóricos utilizando o *software* de simulação ATP. Os testes tiveram objetivo de validar o desempenho do otimizar em um ambiente controlado onde os parâmetros da LT e as variações nos parâmetros fossem conhecidas. Foram estabelecidos sete diferentes casos de simulações teóricas onde o algoritmo do otimizador apresentou resultados satisfatórios e foi capaz de mapear as alterações realizadas e apresentou grau de evolução elevado, EVA acima de 175, indicando erro inferior a 1% em todos os casos estudados.

Com base na metodologia apresentada foram realizadas simulações utilizando dados reais de PMUs. Neste cenário foi apresentada simulações utilizam dados reais de PMUs coletados nos anos de 2021 e 2024. Em ambos os casos foi realizada avaliação do grau de evolução sem realizar nenhuma otimização nos parâmetros da linha de transmissão. Conforme esperado foram identificadas variações no grau de evolução da LT ao longo do tempo corroborando com a ideia de que há variações nos parâmetros da linha de transmissão ao longo do tempo. Adicionalmente, foram permitidas buscas nas variações nos parâmetros da LT em estudo com objetivo de obter maior grau de evolução.

Foi alcançado objetivo de obter maior grau de evolução para a linha de transmissão em estudo após o processo de otimização, os resultados de rastreamentos foram obtidos ao longo do tempo sugerindo variações nos parâmetros da LT. Porém nunca será possível confirmar se efetivamente os novos parâmetros encontrados correspondem de forma mais fidedigna aos parâmetros reais da linha de transmissão analisada. Desta forma, buscou-se utilizar os dados de rastreamento dos parâmetros da LT como dados de entrada para um localizador de falta para avaliar a melhoria advinda da otimização dos parâmetros de entrada. Dois registros de ocorrência de falta foram utilizados e as melhorias de desempenho do localizador foram confirmadas. Espera-se que o rastreamento e otimização dos parâmetros concentrados de uma LT ao longo do tempo através do algoritmo proposto permita melhorias em inúmeras aplicações relacionadas ao controle e proteção de sistemas de transmissão. Esse trabalho apresentou possíveis melhorias na aplicação em localização de faltas.

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Conforme apresentado neste trabalho os métodos tradicionais de determinação de parâmetros de linha de transmissão baseados na geometria da LT apresentam aproximações que inserem erros na determinação dos parâmetros das LTs. Com desenvolvimento de novas tecnologias, dentre elas as PMUs, é possível avaliar novos métodos de determinação e otimização de parâmetros de LTs de forma a obter parâmetros mais próximos do modelo real de uma dada LT em estudo.

Neste trabalho, através do uso de PMU e aplicando conceitos de algoritmos genéticos, foi apresentada uma proposta de metodologia para otimização da estimação dos parâmetros de uma linha de transmissão baseados em dados de PMU. Como fruto desta metodologia são propostos novos valores otimizados dos parâmetros concentrados da linha de transmissão em estudo.

Através da teoria estudada e resultados apresentados neste trabalho foi possível avaliar variações dos parâmetros da linha de transmissão ao longo do tempo. Aplicando dados de PMU coletados de uma linha de transmissão de 500kV pertencente ao SIN foi possível verificar variações no grau de evolução da LT corroborando com a ideia apresentada de que os parâmetros podem sofrer variações por motivos diversos como carregamento da LT e variações de temperatura ambiente.

Testes realizados com dados reais de PMU indicaram que é possível utilizar dados reais de medição sincronizada fasorial para obter melhor precisão na estimação dos parâmetros das LTs. Através de testes aplicando métodos de localização de falta foi possível obter melhores resultados no grau de evolução dos sistemas em estudo corroborando com a ideia de que os novos valores de impedância encontrados se aproximam mais dos valores reais da linha de transmissão.

O estimador proposto neste trabalho apresentou bom desempenho, permitindo o acompanhamento no tempo das variações dos parâmetros concentrados da LT monitorada. Tal acompanhamento abre um leque de possibilidades para estudos diversos em LTs, desde melhorias nos ajustes das funções de proteção, melhores desempenhos dos localizadores de

faltas, validação de parâmetros de projeto e melhores informações para o gerenciamento da operação e manutenção de LTs.

5.2 Trabalhos Futuros

Os estudos desenvolvidos neste trabalho apresentam resultados satisfatórios. Porém, ao longo do desenvolvimento deste estudo foram identificadas oportunidades de trabalho futuro. Em síntese as propostas para futuros trabalhos são:

- Aprimorar os estudos de erros associados aos instrumentos de medição. Com o desenvolvimento de instrumentos óticos e novas tecnologias são esperados instrumentos com menores erros de transformação e conseqüentemente gerando melhores resultados para o algoritmo proposto. Desta forma com o desenvolvimento de novas tecnologias de instrumentos de medição poderá haver melhor desempenho da solução proposta. Adicionalmente há oportunidade de análise de melhorias nas normas de transformadores de instrumentos para que seja obtida ou definida em norma uma relação direta entre os erros associados aos transformadores de instrumentos e o conceito de TVE previsto na norma de sincrofasores;
- As PMUs, por norma, também enviam os dados de frequência e variação de frequência nos frames de dados. Nos sistemas de corrente alternada as reatâncias indutivas e capacitivas são calculadas levando em consideração a frequência do sistema. Com os dados de frequência do sistema sendo calculados juntos aos valores de tensão e correntes sincronizadas no tempo é possível incluir o valor de frequência na determinação das impedâncias reais do sistema com objetivo de complementar as análises e os estudos relacionados a otimização de parâmetros das LTs.
- Neste estudo foi apresentado uma primeira correlação entre os valores de corrente no sistema em estudo e o desempenho do algoritmo principalmente com relação ao rastreamento da sequência zero. Uma oportunidade de desenvolvimento está relacionada em buscar correlacionar as variações de impedância com os dados, por exemplo, de chuvas, temperatura ambiente e carregamento da LT com os valores otimizados de impedância da linha de transmissão.

- Um sistema de transmissão trabalha com pouco desequilíbrio entre suas fases. As componentes simétricas de sequência zero e negativa aumentam conforme desequilíbrio apresentado no sistema. Desta forma uma oportunidade de desenvolvimento está relacionada em buscar metodologia para realizar melhor rastreamento dos parâmetros de sequência zero;
- Um último ponto apresentado neste trabalho como oportunidade de trabalho futuro está relacionado com avaliação de estudos de proteção adaptativa. Nos ajustes das funções de proteção de distância os parâmetros das LTs são considerados constantes ao longo de todo período de operação da LT. Sendo possível determinar os valores de impedância de uma linha de transmissão ao longo do tempo é possível avaliar a criação de um sistema de proteção adaptativa e realizar ajustes mais refinados para os ajustes da função de distância. Atualmente de maneira ampla os ajustes de zona 1 são ajustados em 80% do comprimento da LT de forma a absorver os erros de medição e estimação dos parâmetros. Otimizando os valores de impedância é possível avaliar de aplicar ajustes mais refinados para a proteção de distância.

6 Referências Bibliográficas

- [1] <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros> - Informação retirada do site do ONS. Consulta realizada em 22/06/2024;
- [2] LEMES, Francisco Rodrigues. **Estimação dos parâmetros de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica por meio de medições temporais**. 2024. Tese de Doutorado em Sistema de Potência - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2024.
- [3] Phadke, A.G. ; Thorp, J.s. **History and applications of phasor measurements**. 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006 - Proceedings. 331 - 335. 10.1109/PSCE.2006.296328.
- [4] Fan Chunju, Li Shengfang, Yu Weiyong and K. K. Li, **Study on adaptive relay protection scheme based on phase measurement unit (PMU)**, *2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, Amsterdam, Netherlands, 2004, pp. 36-39 Vol.1, doi: 10.1049/cp:20040057.
- [5] Jiang, Joe-Air ; Yang, Jun-Zhe ; Lin, Ying-Hong ; Liu, Chih-Wen ; Ma, Jih-Chen. . **An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. I. Theory and algorithms**. 2000, Power Delivery, IEEE Transactions on. 15. 486 - 493. 10.1109/61.852973.
- [6] Jiang, Joe-Air, Lin, Ying-Hong, Yang, Jun-Zhe, Tong-Ming Too and Chih-Wen Liu, **An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. II. PMU implementation and performance evaluation**, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1136-1146, Oct. 2000, doi: 10.1109/61.891494.
- [7] Timofeev, D.M.; Klimova, Tatiana. **Analysis of Possibility of Using PMU Based Methods for Providing the Correct Operation of Distance Protection.**, in 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA), 2018, pp. 1-14; 10.1109/RPA.2018.8537231.
- [8] Queiroz, Débora Coelho de., **Estimação dos parâmetros de linhas de transmissão por meio de medições em seus terminais**, 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, p 133, 2020.
- [9] F. O. Passos and C. A. V. Guerrero, **Análise de faltas em sistemas elétricos**. Proteção de Sistemas Elétricos - Coletânea CEPSE -Volume I, 2019.

- [10] Ailson P. de Moura, Adriano Aron F. de Moura e Ednardo P. da Rocha. **Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada**, 2019, Edições UFC
- [11] Paul M. Anderson, **Analysis Of Faulted Power Systems**, 1995, IEEE Press Power Systems Engineering, ISBN: 978-0-780-31145-9, 536 pages
- [12] J. R. Carson, **Wave propagation in overhead wires with ground return**, in *The Bell System Technical Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 539-554, Oct. 1926, doi: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
- [13] A. G. Phadke and J. S. Thorp, **History And Applications Of Phasor Measurements**, 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2006, pp. 331-335, doi: 10.1109/PSCE.2006.296328. keywords:
- [14] Sérgio Louredo Maia LACERDA ;Greyce Hayana Ribeiro CARNEIRO, **Dispositivos Eletrônicos Inteligentes e a Norma IEC61850: União Que Está Dando Certo.**” Anais CONNEPI 2010: 978-85-64320-00-0
- [15] Operados Nacional do Sistema, ONS. **Requisitos mínimos de supervisão e controle para a operação.** Procedimento de Rede – ONS. Disponível em: https://ecmservice.ons.org.br/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.12-RQ_2022.10.docx_3cffe00-1aa5-4187-a0b8-8d190100a34d.pdf. Acesso em 10/11/2024.
- [16] **SEL-5702- Synchrowave Operations.** Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/5702/?lang=pt>. Acesso em: 29 de jul. de 2024.
- [17] Zymler, Rafael, **Validação de Simulações Dinâmicas Sistêmicas Utilizando Registros Sincrofasoriais**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, 2020.
- [18] **IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems**, in *IEEE Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995)*, vol., no., pp.1-65, 22 March 2006, doi: 10.1109/IEEESTD.2006.99376.
- [19] **IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems**, in *IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, vol., no., pp.1-61, 28 Dec. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111219.

- [20] Operados Nacional do Sistema, ONS. **Requisitos mínimos para Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores**. Procedimento de Rede – ONS. Disponível em: https://ecmservice.ons.org.br/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.13-RQ_2020.12.pdf. Acesso em 17/11/2024.
- [21] Massud. Alexandre, de Aquino. Antonio Felipe C, Decker, Ildemar. **Disciplina Medição Fasorial**, Curso de Pós-Graduação em Proteção de Sistemas Elétricos, Cooperação IME e ONS, Edição 2022.
- [22] ANEEL (2017). Edital de leilão nº 02/2017-ANELL, Anexo 6 – Especificações Técnicas Gerais -Características e Requisitos Técnicos Gerais das Instalações de Transmissão Objeto do Leilão nº 02/2017. Disponível em https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_transmissao/documentos/Anexo_T%C3%A9cnico_Geral_Leil%C3%A3o_02_2017.pdf. Acessado em 17/11/2024.
- [23] Pedro César C. Vieira, Ildemar C. Decker, Marcelo N. Agostini, Valmor Zimmer, **Análise De Erros Associados Aos Circuitos De Instrumentação na Medição Fasorial Sincronizada**, Simpósio De Automação De Sistemas Elétricos, Belo Horizonte, 2013.
- [24] Brito, Luiz Carlos Grillo de, **Avaliação dos Erros dos Transformadores de Corrente em Medições de Sincrofasores e em suas Aplicações**. 2011. Dissertação de mestrado - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2011.
- [25] ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas; **NBR 6856; ABR./2021; Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificação e ensaios Transformador de corrente**, 2021.
- [26] ENERGISA. **Especificação Técnica Unificada, ETU – 100.2, “Transformador de potencial capacitivo (TPC) para subestação de distribuição”**. ENERGISA/GTD-NRM/Nº024/2021 Versão 0.0 - Abril / 2021
- [27] Brandão, Milena Almeida Leite, **Estudo de alguns métodos determinísticos de otimização irrestrita**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós Graduação em Matemática, 2010
- [28] Pereira, Marconi de Arruda Pereira, **Classificação de Dados Híbridos Através de Algoritmos Evolucionários**, Universidade Federal de Minas Gerais Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2012.
- [29] Dorigo, M.; Stützle, T. **Ant Colony Optimization**. The MIT Press, Cambridge, MA, 2004, <https://doi.org/10.7551/mitpress/1290.001.0001>

- [30] J. Kennedy and R. Eberhart, **Particle swarm optimization**. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [31] Mendes. Marcus Henrique Soares, **Algoritmos Evolucionários Intervalares para Otimização Ribusta Multiobjetivo**, Tese de Doutorado, UFMG, , 2013.
- [32] <https://github.com/GridProtectionAlliance/openPDC?tab=readme-ov-file>, Informação retirada do site da Grid Protection Alliance. Consulta realizada em 04/08/2024;
- [33] A. Tziouvaras, Jeff Roberts, and Gabriel Benmouyal, **New Multi-Ended Fault Location Design for Two- or Three-Terminal Lines**, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, 1999. Disponível em <https://selinc.com/api/download/2489/> [Acessado em 29/09/2024];
- [34] J.P.L. Salvador, A.C.S. Lima, R. Alipio, M.T. Correia de Barros, **Sensitivity analysis of frequency-Dependent soil models based on rational approximation.**, *Electric Power Systems Research*, Volume 196, 2021.

Anexo A1

Função para calcular matriz Z da linha de transmissão.

```
function [zf] =
CALCULA_Z(tipo_cond,raio_int,raio_ext,resistencia,pos_x,pos_y,pos_vao,separ,alpha,NB,f,L,ro)

%tamanho da matriz original
n=length(tipo_cond);

%calcula rmg
for i=1:n
    %calculo de resistencia por fase
    if NB(i)>0
        req(i)=(4*resistencia(i)*(((raio_ext(i)-raio_int(i))/(2*raio_ext(i)))-((raio_ext(i)-raio_int(i))/(2*raio_ext(i)))^2))/NB(i);
        raio=separ(i)/(2-2*cos(2*pi/NB(i)))^0.5;
        rmg(i)=(NB(i)*exp(-1/4)*raio_ext(i)*(raio^(NB(i)-1)))^(1/NB(i))/100;
    else
        req(i)=4*resistencia(i)*(((raio_ext(i)-raio_int(i))/(2*raio_ext(i)))-((raio_ext(i)-raio_int(i))/(2*raio_ext(i)))^2);
        rmg(i)=exp(-1/4)*raio_ext(i)/100;
    end
end

%calcula Z com todos os condutores
%O valor de 9.869e-4 vem do metodo de John R. Carson
%estudar pagina 169 do livro sobre transmissao
%esclarecer funcao DIST e o REQ;

clear z
for i=1:n
    for k=1:n
        if i==k
            pos_y_med(i)=pos_y(i)-0.7*(pos_y(i)-pos_vao(i));
            pos_y_med(k)=pos_y(k)-0.7*(pos_y(k)-pos_vao(k));
            z(i,k)=req(i) + 9.869e-4*f + j*4e-4*pi*f*log((658.368*(ro/f)^0.5)/(rmg(i)));
        else
            pos_y_med(i)=pos_y(i)-0.7*(pos_y(i)-pos_vao(i));
            pos_y_med(k)=pos_y(k)-0.7*(pos_y(k)-pos_vao(k));
            z(i,k)=9.869e-4*f + j*4e-4*pi*f*log((658.368*(ro/f)^0.5)/(Dist(pos_x(i),pos_y_med(i),pos_x(k),pos_y_med(k))));
        end
    end
end
```

```

%reduz Z 3x3
clear xxxx iiii kkkk zeq
zeqq=z;
for xxxx=1:n-3
    for iiii=1:n-xxxx
        for kkkk=1:n-xxxx
            zeqq(iiii, kkkk, xxxx+1)=zeqq(iiii, kkkk, xxxx)-zeqq(n-
xxxx+1, kkkk, xxxx)*zeqq(iiii, n-xxxx+1, xxxx)/zeqq(n-xxxx+1, n-
xxxx+1, xxxx);
        end
    end
end

%resultados
zf=zeqq([1:3],[1:3],n-xxxx);
zs=(zf(1,1)+zf(2,2)+zf(3,3))/3;
zm=(zf(1,2)+zf(1,3)+zf(2,3))/3;
zf=[zs zm zm;zm zs zm;zm zm zs];
%    z11=zs-zm;
%    z00=zs+2*zm;

end

```

Função para calcular matriz Y da linha de transmissão.

```
function [yf] =
CALCULA_Y(tipo_cond,raio_int,raio_ext,resistencia,pos_x,pos_y,pos_vao,
separ,alpha,NB,f,L,ro)

%tamanho da matriz original
n=length(tipo_cond);

%calcula rmg
for i=1:n
    %calculo de resistencia por fase
    if NB(i)>0
        raio=separ(i)/(2-2*cos(2*pi/NB(i)))^0.5;
        rmg(i)=((NB(i)*raio_ext(i))*(raio^(NB(i)-1)))^(1/NB(i))/100;
    else
        rmg(i)=raio_ext(i)/100;
    end
end

%calcula Z com todos os condutores
clear p
for i=1:n
    for k=1:n
        if i==k
            pos_ymed(i)=pos_y(i)-0.7*(pos_y(i)-pos_vao(i));
            pos_ymed(k)=pos_y(k)-0.7*(pos_y(k)-pos_vao(k));
            p(i,k)=(1/(2*pi*8.859e-
9))*log((2*pos_ymed(i))/(rmg(i)));
        else
            pos_ymed(i)=pos_y(i)-0.7*(pos_y(i)-pos_vao(i));
            pos_ymed(k)=pos_y(k)-0.7*(pos_y(k)-pos_vao(k));
            p(i,k)=(1/(2*pi*8.859e-
9))*log((Dist(pos_x(i),pos_ymed(i),pos_x(k),-
pos_ymed(k)))/(Dist(pos_x(i),pos_ymed(i),pos_x(k),pos_ymed(k))));
        end
    end
end

clear peq
%reduz Z 3x3
peq(:, :, 1)=p;
for x=1:n-3
    for i=1:n-x
        for k=1:n-x
            peq(i, k, x+1)=peq(i, k, x)-peq(n-x+1, k, x)*peq(i, n-
x+1, x)/peq(n-x+1, n-x+1, x);
        end
    end
end

%resultados
```

```
pf=peq([1:3],[1:3],n-x);  
alfaf=inv(pf);  
yf=j*alfaf*2*pi*f;  
  
ys=(yf(1,1)+yf(2,2)+yf(3,3))/3;  
ym=(yf(1,2)+yf(1,3)+yf(2,3))/3;  
yf=[ys ym ym;ym ys ym;ym ym ys];  
%   y11=ys-ym;  
%   y00=ys+2*ym;  
  
end
```