

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

**APRIMORAMENTO DE TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE
REATORES DE NEUTRO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Luan da Silva Balbino

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Setembro de 2023

Luan da Silva Balbino

**APRIMORAMENTO DE TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE
REATORES DE NEUTRO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Dissertação de mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.

Orientador

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Setembro de 2023

B172a Balbino, Luan da Silva.
 Aprimoramento de técnicas de seleção de reatores de neutro em linhas
de transmissão / Luan da Silva Balbino – Campina Grande, 2023.
 126 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2023.
 "Orientação: Prof. Dr. Karcus Marcelus Colaço Dantas, Prof. Dr.
Washington Luiz Araújo Neves."

 Referências.
 1. Linhas de Transmissão. 2. Sistemas Elétricos. 3. Corrente de Arco
Secundário. 4. Reator de Neutro. I. Dantas, Karcus Marcelus Colaço. II.
Neves, Washington Luiz Araújo. III. Título.

CDU 621.315(043)

**APRIMORAMENTO DE TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE
REATORES DE NEUTRO EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

LUAN DA SILVA BALBINO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/09/2023

**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador(a)**

**KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG
Orientador(a)**

**GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)**

**DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc. , UFCG
Examinador(a)**

**BENEDITO DONIZETI BONATTO, Dr., EFEI
Examinador(a)**

**ALÉCIO BARRETO FERNANDES, Dr., CARPEVIE
Examinador(a)**

CAMPINA GRANDE - PB

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato **LUAN DA SILVA BALBINO**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários certificam que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da Dissertação e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **FILIFE EMMANUEL PORFIRIO CORREIA, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 16/10/2023, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **KARCIUS MARCELUS COLACO DANTAS, PROFESSOR 3 GRAU**, em 16/10/2023, às 15:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **DAMASIO FERNANDES JUNIOR, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/10/2023, às 21:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/10/2023, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/10/2023, às 09:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alecio Barreto Fernandes, Usuário Externo**, em 26/10/2023, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luan da Silva Balbino, Usuário Externo**, em 27/10/2023, às 18:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3878365** e o código CRC **071E5AB5**.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à minha esposa Luana, por me apoiar de forma incondicional em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais, Luiz Júlio Balbino e Lucivânia da Silva Balbino, por tudo que fizeram por mim para que eu pudesse chegar a esta etapa.

Agradeço por fim aos meus orientadores, professor Karcus Marcelus Colaço Dantas e professor Washington Luiz Araújo Neves, por aceitarem orientar este trabalho e por suas contribuições nas discussões, esclarecendo as dúvidas que surgiram ao longo do desenvolvimento e tornando possível a obtenção dos resultados.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise paramétrica e sugere uma proposta para determinação de reatâncias para reatores de neutro, utilizados como forma de mitigação da corrente de arco secundário durante faltas monofásicas. Os parâmetros analisados foram o comprimento da linha de transmissão (LT), nível de compensação reativa *shunt* e relação entre capacitâncias de sequência positiva e zero c_1/c_0 . Para isso, uma análise de sensibilidade foi conduzida fazendo-se uso do programa *ATP* (*Alternative Transients Program*) em um conjunto de 10 LTs. Os valores de corrente eficaz e pico da tensão de restabelecimento do arco secundário foram coletados durante simulações de faltas monofásicas. Os dados foram utilizados para identificar a influência devido à alteração dos parâmetros selecionados. O aumento do comprimento tornou as correntes de arco secundário mais elevadas, sendo este efeito acentuado para os menores níveis de compensação. A compensação reativa teve maior impacto na relação entre as reatâncias de sequência positiva e zero considerada “ótima”, sendo este efeito mais notório nas LTs com uma razão c_1/c_0 maior. Um procedimento de ajuste de curvas foi utilizado para obter equações que representassem o conjunto de dados. Dois cenários foram considerados: os reatores de neutro com menores reatâncias cujas correntes resultantes se encontravam abaixo de 50 A (reatores “mínimos”) e os reatores cujas aplicações propiciaram os menores picos de tensão e correntes eficazes, denominados reatores “ótimos”. As análises para o caso “ótimo” levaram a um conjunto de equações que permitem a obtenção dos valores dos reatores de neutro para diferentes LTs com base nas capacitâncias, não dependendo do comprimento da LT. As análises para o caso “mínimo” mostraram-se mais complexas, e não foi possível identificar comportamentos entre diferentes LTs que permitissem a formulação de um conjunto único de equações. Por fim, uma metodologia foi proposta e comparada com resultados da literatura, permitindo o atendimento aos critérios normativos para uma maior faixa de compensação reativa.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão; Religamento monofásico; Corrente de arco secundário; Reator de neutro.

ABSTRACT

This paper presents a parametric analysis and suggests a proposal for determining reactances for neutral reactors used to mitigate secondary arc current during single-phase faults. The parameters analyzed were the length of the transmission line (TL), the level of reactive compensation *shunt*, and the ratio between positive and zero sequence capacitances c_1/c_0 . To this end, a sensitivity analysis was conducted using the program *ATPDraw (Alternative Transients Program)* on a set of 10 TLs. The effective current and the first peak of the transient restoring voltage (TRT) values were collected during simulations of single-phase faults. The data was used to identify the influence of changing the selected parameters. Increasing the length made the secondary arc currents higher, and this effect was more pronounced for the lower compensation levels. Reactive compensation had a greater impact on the ratio between the positive and zero sequence reactances considered “optimal”, with this effect being more noticeable in TLs with a higher c_1/c_0 ratio. A curve-fitting procedure was used to obtain equations that represented the data set. Two scenarios were considered: the neutral reactors with the lowest reactances whose resulting currents were below 50 A (“minimum” reactors) and those whose applications provided the lowest TRT peaks and effective currents, called “optimal” reactors. The analyses for the “optimal” case led to a set of equations that allow neutral reactor values to be obtained for different TLs based on capacitances without depending on the length of the TL. The analyses for the “minimum” case proved to be more complex, and it was not possible to identify behaviors between different TLs that would allow a single set of equations to be formulated. Finally, a methodology was proposed and compared with results in the literature, allowing the normative criteria to be met for a wider range of reactive compensation.

Keywords: Transmission Lines; Single-phase auto-reclosing; Secondary arc current; Neutral reactor.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Símbolos	xvi
Glossário	xvii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Estrutura	5
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	6
2.1 Religamento automático em Linhas de Transmissão	6
2.1.1 Religamento Monopolar Tradicional (SPAR)	7
2.1.2 Religamento Monopolar Adaptativo (ASPAR)	8
2.2 Etapas de uma Manobra Monopolar	9
2.3 Cálculo da corrente de Arco Secundário e TRT	11
2.3.1 Linhas de Transmissão sem compensação em derivação	13
2.3.2 Linhas de Transmissão com compensação em derivação	15
2.3.3 Linhas de Transmissão com compensação em derivação e reator de neutro	17

2.3.3.1	Reator de neutro como método de extinção de Arco Secundário	18
2.3.3.2	Procedimento para escolha do reator de neutro	21
2.4	Projeto Básico	23
2.4.1	Religamentos Automáticos	24
2.4.1.1	Critério 1 - Extinção do arco secundário no religamento monopolar	25
2.4.1.2	Critério 2 - Extinção do arco secundário no religamento monopolar	26
2.5	Síntese do capítulo	27
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica		28
3.1	Utilização de Reatores de Neutro	28
3.1.1	Considerações Finais sobre a Revisão Bibliográfica	35
Capítulo 4 – Metodologia		37
4.1	Visão Geral	37
4.2	Dados utilizados	38
4.2.1	Linhas de transmissão	38
4.2.2	Variações dos Parâmetros de Simulação	39
4.3	Etapas do trabalho	41
4.3.1	Simulações computacionais	42
4.3.2	Simulações no domínio da frequência	45
4.3.3	Obtenção e análise das curvas indicativas	45
4.3.4	Obtenção das equações	49
4.4	Síntese do Capítulo	50
Capítulo 5 – Resultados		51
5.1	Aspectos gerais	51
5.1.1	Variação de comprimento (km)	53

5.1.2	Variação do nível de compensação (F)	59
5.2	Ajuste de curvas	64
5.2.1	Cenário com reator ótimo	64
5.2.1.1	Obtenção dos coeficientes	68
5.2.1.2	Avaliações de ressonâncias e correntes eficazes	72
5.2.2	Cenário com reator mínimo	77
5.2.3	Cenário intermediário	86
5.3	Resultados comparativos	88
5.3.1	Avaliação dos resultados - Reator ótimo	91
5.3.2	Avaliação dos resultados - Reator intermediário	98
5.4	Síntese do Capítulo	103
Capítulo 6 – Conclusões		104
6.1	Trabalhos futuros	107
Referencias		108
Apêndice A – Dados do sistema elétrico referente a interligação norte-nordeste.		113
Apêndice B – Tabelas de dados - erros percentuais.		120

LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação das etapas de uma manobra de religamento monopolar.	9
2.2	Oscilografia de tensão medida durante falta monofásica real.	11
2.3	Representação dos acoplamentos de uma linha de transmissão.	12
2.4	Diagrama LT transposta com representação dos acoplamentos capacitivos. . . .	12
2.5	Diagrama LT transposta com acoplamentos capacitivos e atuação da proteção. .	13
2.6	Diagrama LT transposta com acoplamentos capacitivos - circuito equivalente. . .	14
2.7	Diagrama simplificado de uma LT Transposta com reatores em derivação após atuação da proteção.	16
2.8	Circuito equivalente Thévenin (circuito com compensação em derivação).	16
2.9	LT transposta com compensação em derivação e reator de neutro.	19
2.10	Representação do esquema para conexão do reator de neutro e transformação estrela-delta.	19
2.11	Circuito equivalente de Thévenin (com reator de neutro).	20
2.12	Esquema de 4 reatores (com reator de neutro).	22
2.13	Resumo do procedimento para novas LTs.	24
2.14	Curva indicativa para análise da extinção da corrente de arco secundário (tempo morto $\leq 500\text{ ms}$)	25
2.15	Curva indicativa de tempo morto para extinção do arco secundário versus valor eficaz da corrente de arco secundário.	26
4.1	Trecho da interligação Norte-Nordeste (500 kV).	38
4.2	Representação LT_1 com reatores para análise de sensibilidade.	40

4.3	Marcações de tempo para a manobra monopolar.	41
4.4	Procedimento Geral.	41
4.5	Código para captura das grandezas de simulação em linguagem MODELS.	42
4.6	Exemplos de detecção do pico da TRT para cenários diferentes de simulação.	44
4.7	I_{arco} e TRT (compensação 85%).	47
4.8	Diagrama do procedimento de obtenção das curvas - r_h vs compensação reativa para a LT com $c_1/c_0 = 1,87$ e 400km.	48
5.1	Curvas I_{rms} e V_{TRT} para 400 km de comprimento.	52
5.2	Corrente eficaz I_{rms} para diferentes comprimentos — LT com $c_1/c_0 = 1,87$	54
5.3	Curva indicativa - I_{arco} e V_{TRT} (compensação 30%).	55
5.4	I_{rms} e V_{TRT} para diferentes comprimentos.	56
5.5	Correntes de arco secundário (I_{arco}) para diferentes LTs e níveis de compensação (F) - 400km.	60
5.6	I_{rms} para diferentes níveis de compensação — $c_1/c_0 = 1,87$	62
5.7	r_h médio para $c_1/c_0 = 1,69$	67
5.8	Aproximação das curvas para os coeficientes das equações - cenário ótimo.	69
5.9	Erro percentual - r_h em relação a compensação reativa.	71
5.10	Razão r_h para diferentes LTs em função da compensação reativa para o cenário ótimo.	72
5.11	Corrente I_{rms} e Tensões na faixa de 56 - 66 Hz.	73
5.12	Deslocamento de r_h para o caso mínimo - $c_1/c_0 = 1,87$	77
5.13	r_h para diferentes LTs em função da compensação reativa para o cenário mínimo.	78
5.14	Comparação de cenários c_1/c_0 - Ótimo x Mínimo	80
5.15	r_h em relação à compensação reativa para diferentes comprimentos.	83
5.16	Variação dos coeficientes a, b e c para as LTs - cenário mínimo.	85
5.17	Cenário intermediário.	87

5.18	Procedimento proposto para reator intermediário.	87
5.19	Exemplo de curvas obtidas para reatores de neutro com diferentes métodos.	89
5.20	Comparação dos valores de reatores de neutro para $c_1/c_0 = 1,54$ e 400 km de comprimento.	91
5.21	Comparação de X_n para $c_1/c_0 = 1,59$ e $c_1/c_0 = 1,69$ - 400 km de comprimento.	92
5.22	Comparação entre as duas equações para 400 km de comprimento.	93
5.23	Comparação de X_n para $c_1/c_0 = 1,71$ - 400 km de comprimento.	94
5.24	Comparação de X_n para $c_1/c_0 = 1,75$ e $c_1/c_0 = 1,78$ - 400 km de comprimento.	95
5.25	Comparação de X_n para para diferentes linhas de transmissão - 400 km de comprimento.	96
5.26	Exemplo do crescimento da curva com a equação de potência adotada.	98
5.27	Comparação para os reatores intermediários e sub-ótimos - $c_1/c_0 = 1,54$	99
5.28	Comparação para os reatores intermediários e sub-ótimos - $c_1/c_0 = 1,59$	100
5.29	Comparação para os reatores intermediários e sub-ótimos - $c_1/c_0 = 1,87$	101
A.1	Diagrama unifilar referente à interligação Norte-Nordeste (dados de 2009).	113
A.2	Sistema completo modelado no ATPDraw.	114

LISTA DE TABELAS

1.1	Principais causas de perturbações em linhas de transmissão da Rede Básica.	2
3.1	Resumo da revisão bibliográfica.	34
4.1	Dados de sequência das linhas de transmissão utilizadas nas simulações.	38
4.2	Conjunto de parâmetros - arquivo_base.atp	44
4.3	Exemplo de dados obtidos por meio das simulações (compensação 85%).	46
5.1	Intervalos de r_h obtidos para todas as linhas de transmissão sob estudo.	58
5.2	r_h em relação ao nível de compensação (Pt.1) - cenário ótimo.	65
5.3	r_h em relação ao nível de compensação (Pt.2) - cenário ótimo.	66
5.4	Erros percentuais para aproximação de r_h pela média - $c_1/c_0 = 1,69$	67
5.5	Valores médios de r_h para diferentes LTs - cenário ótimo.	68
5.6	Comparação dos coeficientes médios com a aproximação para diferentes LTs.	71
5.7	r_h em relação ao nível de compensação (Pt.1) - cenário mínimo	81
5.8	r_h em relação ao nível de compensação (Pt.2) - cenário mínimo	82
5.9	Coeficientes a, b e c para as LTs sob estudo - cenário mínimo.	84
5.10	Valores mínimos de compensação para todas as LTs.	89
A.1	Linhas de transmissão 500 kV - Parâmetros elétricos.	115
A.2	Potência nominal e relação X_0/X_1 dos reatores de linha (500 kV).	116
A.3	Reatância dos bancos de capacitores série.	117
A.4	Potência nominal e relação X_0/X_1 dos reatores de barra.	117

A.5	Impedâncias equivalentes das fontes.	118
A.6	Transformadores - Impedâncias.	118
A.7	Curva de saturação do transformador da SE Milagres	118
A.8	Curva de saturação do transformador da SE S. J. do Piauí.	119
A.9	Curva de saturação do transformador da SE Itacaiúnas.	119
B.1	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,54$ - cenário ótimo.	120
B.2	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,59$ - cenário ótimo.	121
B.3	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,69$ - cenário ótimo	121
B.4	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,71$ - cenário ótimo	122
B.5	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,75$ - cenário ótimo	122
B.6	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,78$ - cenário ótimo	123
B.7	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,79$ - cenário ótimo	123
B.8	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,84$ - cenário ótimo	124
B.10	Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,87$ - cenário ótimo	124
B.11	Erros encontrados para aproximação da média de r_h para todas as LTs (Pt. 1) - cenário ótimo.	125
B.12	Erros encontrados para aproximação da média de r_h para todas as LTs (Pt. 2) - cenário ótimo.	126

LISTA DE SÍMBOLOS

AT	- Fase-terra.
B_0, B_1	- Susceptância indutiva do reator de sequência zero e positiva, respectivamente.
B'_0, B'_1	- Susceptância capacitiva da linha de sequência zero e positiva, respectivamente.
C_Δ	- Capacitância equivalente entre fases da linha de transmissão.
C_0, C_1	- Capacitância total para sequência zero e positiva, respectivamente.
c_0, c_1	- Capacitância por km para sequência zero e positiva, respectivamente.
C_g	- Capacitância equivalente entre a fase e a terra.
F	- Grau de compensação da linha de transmissão.
L_0, L_1	- Indutâncias do reator para sequência zero e positiva, respectivamente.
L_m	- Indutância entre fases ocasionada pela inserção do reator de neutro.
L_n	- Indutância do reator de neutro.
L	- Comprimento (km).
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	- Tensões de fase.
X_n	- Reatância de neutro.
X_L	- Reatância de linha.

GLOSSÁRIO

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ASPAR - *Adaptative Single-Phase Auto-Reclosing.*
- ATP - *Alternative Transients Program.*
- EAT - Extra-Alta Tensão.
- EMTP - *Electromagnetic Transients Program.*
- EPE - *Empresa de Pesquisa Energética.*
- IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*
- LT - Linha de Transmissão.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- PB - Projeto Básico.
- SAC - *Secondary Arc Current.*
- SIN - Sistema Interligado Nacional.
- SPAR - *Single-Phase Auto-Reclosing.*
- TRT - Tensão de Restabelecimento Transitória.
- UAT - Ultra-Alta Tensão.
- UFMG - Universidade Federal de Campina Grande.

INTRODUÇÃO

Dada a susceptibilidade da ocorrência de interrupções de fornecimento nos sistemas de transmissão de energia elétrica, os estudos relacionados ao aprimoramento de sistemas de proteção das linhas de transmissão (LT) possuem grande relevância, sendo continuamente explorados e desenvolvidos, de modo a conferir maior segurança e robustez nos processos de isolamento dos defeitos, mitigação das sobretensões resultantes e para prover o restabelecimento da operação de forma breve.

O Operador Nacional do Sistema (ONS), órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), mantém estudos permanentes de observação, análise e diagnóstico, exatamente para possibilitar a prevenção ou mitigação de uma perturbação de grande porte em decorrência de uma falha, restringindo sua propagação e recompondo as cargas do sistema.

Dentre as possíveis falhas que podem acometer os sistemas de transmissão de alta tensão, a literatura evidencia que curtos-circuitos de caráter monofásico são mais comuns, correspondendo estatisticamente à maior parcela dos registros de ocorrência (TAYLOR et al., 1986; ESZTERGALYOS et al., 1992; BAN; PRIKLER; BANFAI, 2001). Além disso, tais faltas são majoritariamente transitórias, sendo naturalmente extintas em um curto intervalo de tempo (KIMBARK, 1964; ESZTERGALYOS et al., 1992).

No contexto brasileiro, este tipo de informação encontra-se disponível em documentos de análise de religamentos forçados, como por exemplo em ANEEL (2018), cujo resumo de ocorrências para diversas transmissoras entre os anos de 2016 e 2017 confirma a predominância de faltas fase-terra. Ademais, o ONS (2022) disponibiliza em seu banco de dados o histórico de indicadores de desempenho do SIN, para quantificar perturbações e suas respectivas causas, como mostrado na Tabela 1.1, para os anos de 2020, 2021 e 2022, respectivamente.

Tabela 1.1: Principais causas de perturbações em linhas de transmissão da Rede Básica.

Causas	2020		2021		2022 ¹	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Condições Meteorológicas Adversas	703	29,39	701	29,74	180	49,86
Queimadas	587	24,54	632	26,81	9	2,49
Vegetação	134	5,60	87	3,69	27	7,48
Falhas Humanas	109	4,56	134	5,69	24	6,65
Equipamentos e Acessórios	145	6,06	167	7,09	23	6,37
Total ²	2392	100	2357	100	361	100

¹ Dados disponíveis até 02/2022.

² O valor total engloba outras causas não listadas.

Fonte: (ONS, 2022)

Os estudos acerca da manobra monopolar em sistemas de potência datam de muitas décadas atrás, ganhando cada vez mais foco à medida que as concessionárias passavam a operar com níveis de extra-alta tensão (EAT) e ultra-alta tensão (UAT) (KIMBARK, 1975). Tais métodos recebem a nomenclatura SPAR (do inglês, *Single-Phase Auto-Reclosing*) e funcionam de modo a realizar o procedimento de abertura e religamento em ambos os terminais da LT, somente na fase sob defeito, a partir de um tempo de atuação fixo pré-estabelecido (tempo morto).

Na década de 70, no trabalho apresentado pelo IEEE *System Stability Working Group* (KIMBARK, 1975), composto por uma vasta bibliografia de artigos acerca da manobra monopolar, é possível encontrar abordagens relativas à avaliação da estabilidade do sistema, benefícios do uso de SPAR em detrimento da manobra trifásica, perfis das grandezas elétricas resultantes, surgimento e extinção do arco secundário e sobretensões de chaveamento, podendo-se citar os trabalhos de Goldsborough e Hill (1942), Trainor e Parks (1947), Harrington e Starr (1949), Knudsen (1962), Kimbark (1964), dentre outros.

Com o decorrer dos anos, novos aspectos passaram a ser incluídos nas análises e limitações operacionais no religamento monopolar tradicional foram identificadas, surgindo assim a necessidade de melhorar o desempenho do método, modificando-o para torná-lo mais rápido, robusto e seguro. Isto se dá, não somente ao possibilitar a distinção entre defeitos permanentes e não permanentes, mas também ao tornar possível encontrar o instante adequado para realizar a manobra, evitando tentativas de restabelecimento com a presença do curto-circuito ou tempo excessivo de desconexão da fase e, conseqüentemente, aumentando a taxa de religamentos bem-

sucedidos (AGGARWAL et al., 1994; LUO et al., 2017). Neste sentido, foram desenvolvidas as abordagens conhecidas como ASPAR (do inglês, *Adaptive Single-Phase Auto-Reclosing*), que possuem como principal característica o funcionamento com tempo morto definido dinamicamente.

Dentre os eventos observados com o uso da manobra monopolar, o mais relevante deles é relacionado ao chamado arco secundário (CAMARA, 2010). O arco secundário pode ser considerado como uma continuação do arco primário e se estabelece a partir do instante de isolamento da fase na qual o defeito ocorre, sendo predominantemente mantido pelo acoplamento capacitivo existente entre as fases em funcionamento e a fase em aberto. Este fenômeno é particularmente importante, pois a avaliação correta do momento de extinção do arco de corrente, influenciado por fatores externos e internos à rede, possui alto impacto e é requisito obrigatório para que a manobra monopolar possa ser realizada de forma eficaz.

Juntamente a isto, a compreensão do comportamento resultante das tensões nos terminais da fase pós-extinção do arco ganha destaque, pois, notoriamente, a aplicação de métodos para controle de sobretensões ou inclusão de equipamentos para auxiliar na extinção do arco secundário causam uma alteração no perfil da grandeza elétrica observada, sendo também parte importante da avaliação de sucesso da manobra.

Para aumentar a probabilidade do sucesso da manobra monopolar, diversos métodos são apresentados na literatura com o objetivo de minimizar os efeitos dos acoplamentos entre fases e, conseqüentemente, reduzir a amplitude da corrente de arco secundário. Dentre as opções, a mais usual diz respeito à inclusão de um reator adicional em linhas de transmissão que já possuam a presença de compensação reativa, sendo este denominado reator de neutro, cujos conceitos e aplicações serão discutidas ao longo deste trabalho.

Na literatura, encontram-se algumas metodologias distintas para determinação do valor de reatância de neutro, como por exemplo em Kimbark (1964) e Jafarian, Eskandari e Sanaye-Pasand (2016). No entanto, no primeiro caso, observa-se que os reatores de neutro tendem a ter valores consideravelmente elevados para níveis de compensação mais baixos, o que os torna impraticáveis em muitos contextos. Na segunda proposta, os valores obtidos são notavelmente reduzidos; entretanto, essa redução resulta em um aumento intrínseco das correntes de arco secundário, restringindo sua aplicação consideravelmente. Logo, existe a necessidade de se

avaliar uma solução intermediária, que propicie um valor factível de reatância, mantendo o atendimento às normas e o funcionamento em uma maior quantidade de cenários.

Estudos e avaliações relacionados à extinção do arco secundário compõem parte dos requisitos necessários para execução do Projeto Básico (PB) (ONS, 2013), documento cujo objetivo é definir diretrizes para o planejamento, construção e comissionamento de LTs no SIN, tornando possível identificar, ainda na fase de projeto, necessidades técnicas de aquisição e inserção de equipamentos, adoção de medidas mitigatórias, restrições operacionais ou riscos futuros durante o ciclo de vida do sistema, com impactos financeiros, que devem ser previstos com antecedência.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação possui como objetivo geral a proposição de uma metodologia para determinação de valores para reatores de neutro. O resultados foram obtidos com base em uma análise paramétrica e de sensibilidade em um conjunto de 10 LTs durante a simulação de manobras de religamento monopolar.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Determinar o valor ótimo e mínimo do reator de neutro (X_n) com base em dados dos reatores de linha (X_L) e nas características elétricas da LT, com a relação entre as capacitâncias de sequência positiva (c_1) e sequência zero (c_0), que exercem influência direta no acoplamento mútuo entre fases.
- Propor uma técnica para obtenção de um reator intermediário, entre o cenário “ótimo” e “mínimo”.
- Realizar um estudo e fazer apontamentos sobre a influência do grau de compensação e do comprimento da linha de transmissão no comportamento da corrente de arco secundário, para diferentes LTs.
- Confrontar as aproximações obtidas com resultados da literatura.
- Discutir os resultados obtidos mediante o procedimento vigente para avaliação e implementação da manobra monofásica no desenvolvimento do Projeto Básico (PB).

1.2 ESTRUTURA

O presente Capítulo apresenta uma breve contextualização acerca do uso de manobras monopulares, além de listar os objetivos deste trabalho de dissertação.

No Capítulo 2 é abordada a fundamentação teórica, apresentando os conceitos e tópicos necessários para o entendimento do tema proposto, tais como religamento monopolar tradicional e adaptativo, etapas de realização da manobra, fenômeno do arco secundário e TRT, compensação reativa em derivação, critérios vigentes nos Procedimentos de Rede para extinção do arco secundário e atendimento aos requisitos do Projeto Básico.

O Capítulo 3 consiste na revisão bibliográfica, com foco em diferentes aplicações adotadas ao longo dos anos com o uso de reatores de neutro como forma de mitigação da corrente de arco secundário.

No Capítulo 4, são detalhados os dados e a metodologia adotada para a obtenção dos resultados. Inicialmente, é apresentado o sistema modelado, fornecendo os dados de sequência das linhas de transmissão utilizadas e descrevendo os cenários de interesse da pesquisa. Além disso, é apresentado o conjunto de variações nos parâmetros adotados. Em seguida, são explicados os procedimentos para a execução das simulações, o ajuste de curvas e a análise dos respectivos resultados.

No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Inicialmente, é realizada uma avaliação acerca de como as variações dos parâmetros escolhidos impactam nos resultados para as diferentes linhas de transmissão. Em seguida, são discutidos os cenários referentes aos reatores considerados ótimos e mínimos, com o objetivo de identificar padrões e limitações. Por fim, é realizada uma avaliação quantitativa das equações encontradas em relação aos resultados de simulação e às abordagens presentes na literatura.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros para a continuidade da pesquisa.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este Capítulo possui como objetivo explicitar conceitos básicos para o entendimento do tema. Serão discutidos os Métodos de Religamento Monopolar, surgimento e extinção do Arco Secundário, compensação reativa em derivação e critérios vigentes nos Procedimentos de Rede para avaliação do fenômeno de arco secundário.

2.1 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As manobras de proteção para abertura e religamento utilizadas em LTs, buscando garantir a segurança e integridade dos operadores e do sistema mediante a necessidade de interrupções, podem ser classificadas de acordo com duas categorias a depender dos equipamentos e esquemas utilizados (ONS, 2021a), sendo elas: Manobra Tripolar e Manobra Monopolar. Esta última categoria será o foco deste trabalho e terá a discussão aprofundada em seções posteriores.

A manobra tripolar, cuja aplicação pode ser efetuada para todos os tipos de falta (fase-terra, fase-fase-terra, fase-fase, trifásica), corresponde ao procedimento de abertura simultânea e posterior religamento dos 3 terminais dos disjuntores em ambos os lados da linha, isolando-a durante a ocorrência da falta. Esta manobra é mais comum do que a manobra monopolar, que é restrita para ocorrências de defeitos fase-terra. Entretanto, o religamento tripolar possui limitações operacionais, no que diz respeito a causar maior possibilidade de perda de estabilidade do sistema, aumento de sobretensões de manobras, risco de propagação por efeito cascata e ao fato de prover uma interrupção completa de fornecimento durante o processo, mesmo nos casos onde a falta envolva somente uma das fases (ESZTERGALYOS et al., 1992; ZEVALLOS, 2007). Assim, para faltas monofásicas transitórias, a aplicação de métodos de abertura e religamento monopulares são mais indicados, dado que permitem a continuidade parcial do fornecimento e ocasionam esforços menos severos aos equipamentos durante procedimentos de manobra do

que a opção tripolar (ONS, 2021a).

Dentro desta categoria de religamento são divididos dois grupos, sendo o primeiro deles relacionado à manobra monopolar tradicional, que atua com tempo morto fixo e o segundo relacionado aos métodos cujo processo de determinação do instante para o religamento ocorre de forma adaptativa. Além disso, podem-se ainda encontrar na literatura diversas subdivisões no método adaptativo, classificando-os de acordo com o tipo de técnica empregada pelos autores e sua aplicação ou não para LTs compensadas (KHAN; BI; JIA, 2019b; DANTAS et al., 2021).

2.1.1 Religamento Monopolar Tradicional (SPAR)

O métodos SPAR (do inglês, *Single-Phase Auto-Reclosing*) possuem como característica a atuação de forma seletiva, ou seja, os disjuntores de proteção isolam somente a fase com a presença da falta, ao passo que as demais fases permanecem em operação transmitindo cerca de 54% da potência do sistema (KIMBARK, 1976; SARMIENTO; TAVARES; GOLE, 2021). Além disso, a tentativa da manobra de religamento da fase ocorre após o decorrer de um tempo predeterminado, comumente referenciado como tempo morto (do inglês, *dead time*), compreendido entre 0,5 s e 1,5 s (TAYLOR et al., 1986), que corresponde ao intervalo entre a abertura da fase defeituosa e seu restabelecimento.

Entretanto, a utilização de um intervalo de tempo fixo acaba trazendo à tona ao menos três tópicos de discussão. O primeiro deles, menos problemático, diz respeito aos casos nos quais o arco secundário é extinto com tempo inferior ao tempo morto do sistema de proteção, configurando um cenário onde o religamento poderia ser realizado de forma mais ágil (MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009; DIAS; TAVARES, 2017). Logo, este tópico diz respeito a otimização do procedimento, garantindo o restabelecimento da fase tão logo seja possível.

O segundo tópico está relacionado às situações nas quais o tempo morto fixo não é suficiente para que o fenômeno de arco secundário seja completamente extinto, dada a influência de inúmeros fatores em sua intensidade e duração. Logo, o sistema poderá ser submetido a tentativas de religamento com a presença de um curto-circuito, pelo fato do arco se alongar por um intervalo de tempo superior ao pré-estabelecido pela proteção, trazendo problemas para a operação, estabilidade e podendo causar danos aos equipamentos (ZHALEFAR; ZADEH; SIDHU, 2015).

Por último, e de fato mais grave, diz respeito aos cenários onde o sistema tenta realizar a manobra de religamento com a presença de uma falha de caráter permanente, dado que métodos SPAR tradicionais não possuem capacidade de discriminar o tipo da falta (KHAN; BI; JIA, 2019b), evidenciando a necessidade de mecanismos de monitoramento e classificação da natureza do evento. Nestes casos, com falhas sequenciais no procedimento de restabelecimento, recomenda-se a realização da abertura trifásica do sistema (MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009).

Dessa forma, até os dias atuais, permanecem em desenvolvimento abordagens que buscam mitigar as dificuldades inerentes ao método tradicional, sendo estas conhecidos como ASPAR (do inglês, *Adaptive Single-Phase Auto-Reclosing*), cujos conceitos são comentados no tópico a seguir.

2.1.2 Religamento Monopolar Adaptativo (ASPAR)

O método ASPAR surge da necessidade de realizar a identificação e classificação do tipo de falta, otimizando o tempo entre a abertura e o restabelecimento do sistema. Assim, além de tornar o procedimento mais seguro e com maior taxa de religamentos bem-sucedidos, ao evitar atuação incorreta em cenários que possam vir a comprometer fisicamente os equipamentos e instalações, também o torna mais rápido, à medida que a fase é reconectada ao sistema não mais com um tempo fixo, e sim a partir do instante no qual a identificação da extinção do arco é feita (MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009).

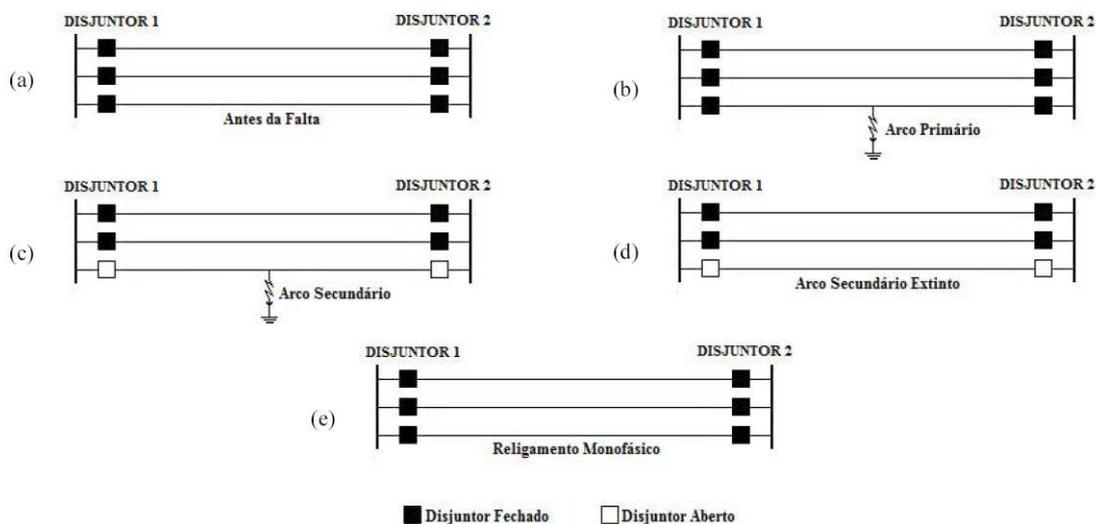
Para atingir tal fim, a literatura traz uma gama de propostas distintas, onde são encontrados desde autores cujas soluções baseiam-se em conceitos simplificados, como também outras computacionalmente mais sofisticadas, sendo possível listar aplicações embasadas em avaliação harmônica de tensão e/ou corrente (LUO; HUANG; JIANG, 2016; MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009), Transformada de Fourier Discreta (MATOS; TAVARES; MENDES, 2018), Transformada *Wavelet* (KHAN; BI; JIA, 2019a), transformações modais (JAMALI; PARHAM, 2010; DANTAS et al., 2021), Inteligência Artificial (VAHIDI; JANNATI; HOSSEINIAN, 2008), estimação fasorial (GUZMÁN et al., 2010; NAGPAL et al., 2016; ZHALEFAR; ZADEH; SIDHU, 2015), métodos em tempo real, dentre outras.

Apesar do grande avanço obtido com métodos adaptativos, faz-se importante salientar que ainda são encontrados obstáculos na aplicação de forma generalista, ou seja, cujo método contemple o uso em linhas com e sem a presença de compensação em derivação. Esta dificuldade se dá normalmente pela alteração das grandezas elétricas monitoradas, especialmente a tensão resultante da fase sob falta (JIAXING et al., 2018), para diferentes graus de compensação.

2.2 ETAPAS DE UMA MANOBRA MONOPOLAR

Durante a ocorrência de uma falta fase-terra (AT) transitória em uma LT de alta tensão, e a atuação de sua respectiva proteção, uma sequência de eventos podem ser observados, tal como representado na Figura 2.1. Tais etapas serão detalhadas e brevemente discutidas, partindo do pressuposto que a linha esteja operando em pleno funcionamento antes da ocorrência, conforme 2.1(a).

Figura 2.1: Representação das etapas de uma manobra de religamento monopolar.



Fonte: Adaptado de (MONTANARI; TAVARES; PORTELA, 2009)

Inicialmente, no cenário da Figura 2.1(b), quando o sistema é acometido pela falta, é estabelecido o chamado arco primário de corrente, podendo este assumir valores da ordem de dezenas de kA, a depender do nível de tensão, resistência, potência de curto-circuito e local da falta, dentre outros fatores. O curto-circuito é alimentado pelas tensões terminais do sistema, até a identificação do defeito e disparo de atuação dos disjuntores.

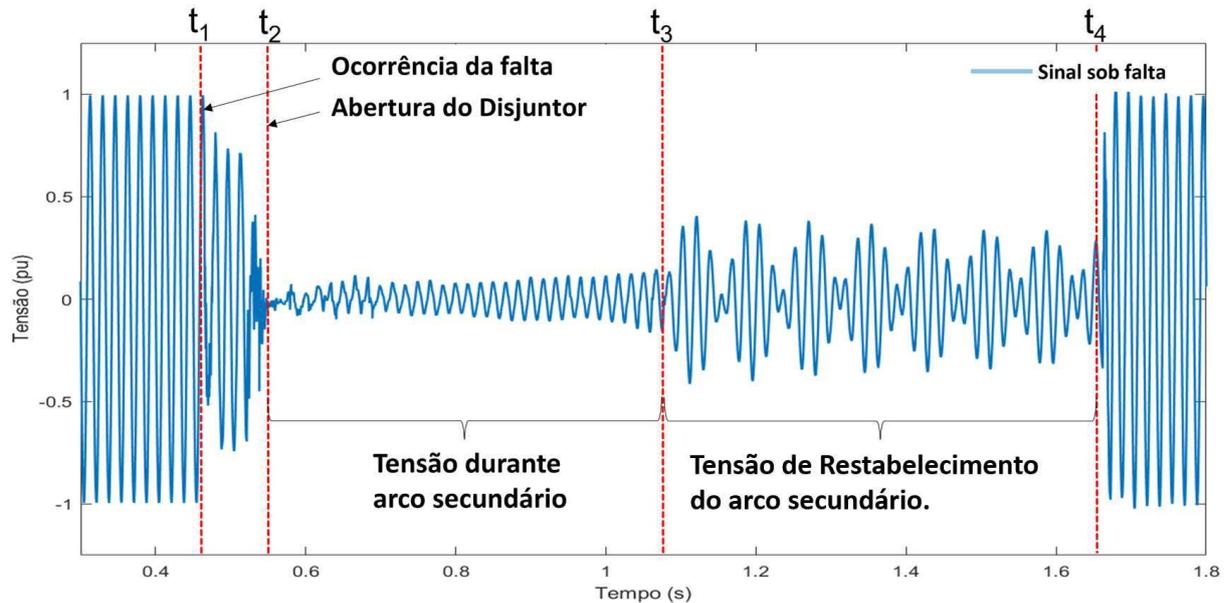
Como mostrado em D’ajuz et al. (1987), com a identificação do curto-circuito, os disjuntores da fase são acionados e abertos, isolando o trecho, conforme Figura 2.1(c). A partir do isolamento das fontes externas, com o ar ainda ionizado pelo rompimento do dielétrico causado pelo arco primário, surge uma corrente de menor amplitude denominada corrente de arco secundário (SAC, do inglês *Secondary Arc Current*). Neste instante, também ocorre o aparecimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) nos terminais dos disjuntores, de forma menos significativa a priori, devido à presença do curto-circuito.

Esta corrente permanece sustentada com a tensão induzida causada pelos acoplamentos capacitivos e indutivos existentes entre a fase sob falta e as fases em funcionamento (KIMBARK, 1975; ESZTERGALYOS et al., 1992; GODOY et al., 2012) e sua redução ou extinção é primordial para o funcionamento adequado do processo de religamento monopolar. Logo, deve-se assegurar que exista uma elevada probabilidade de extinção do arco, antes de realizar a manobra (ZEVALLOS, 2007). No entanto, a identificação deste instante não é uma tarefa trivial, pois trata-se de um evento complexo com características aleatórias, cuja duração é influenciada por inúmeros fatores, podendo-se citar: amplitude da corrente do arco primário e secundário, localização da falta, potência de curto-circuito, esquema de transposição da LT, amplitude da tensão de restabelecimento transitória, tipo e nível de compensação da linha, comprimento do arco elétrico, velocidade do vento, umidade e temperatura (KIMBARK, 1964; MONTANARI et al., 2009).

Por fim, considerando que o arco secundário tenha se extinguido, o sistema resultante é apresentado na Figura 2.1(d), onde o processo de religamento monopolar pode ocorrer de forma segura. Entretanto, antes da realização da manobra, deve-se também observar a tensão presente nos terminais dos disjuntores pós-extinção do arco secundário. A tensão de restabelecimento do arco secundário possui amplitudes e perfis de oscilação distintos, a depender do nível de tensão da rede, características elétricas da linha de transmissão e grau de compensação. A tensão de restabelecimento do arco secundário pode vir a causar a reignição do arco durante a tentativa de religamento, caso ela possua amplitude ou taxa de crescimento suficientemente grande para tal (D’AJUZ et al., 1987; ESZTERGALYOS et al., 1992).

As etapas citadas podem ser averiguadas na Figura 2.2, onde apresenta-se um registro de ocorrência de uma falta monofásica, com as respectivas marcações de tempo.

Figura 2.2: Oscilografia de tensão medida durante falta monofásica real.



Fonte: Autoria Própria.

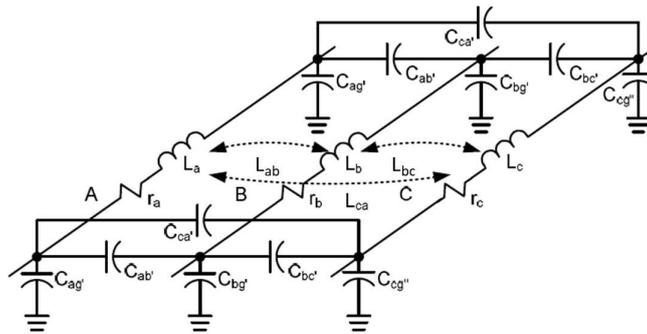
1. $t < t_1$: Sistema sob condições normais de operação.
2. $t_1 \leq t < t_2$: Ocorrência da falta monofásica, estabelecimento da corrente de arco primário e diminuição da tensão nos terminais de medição.
3. $t_2 \leq t < t_3$: Atuação da proteção monofásica e tensão durante arco secundário.
4. $t_3 \leq t < t_4$: Extinção do arco secundário e surgimento da tensão de restabelecimento do arco secundário.
5. $t > t_4$: Religamento dos disjuntores, retomando a operação normal da LT.

2.3 CÁLCULO DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO E TRT

Com o entendimento acerca da sequência de eventos apresentados na seção anterior, as próximas subseções dedicam-se a explicitar como a corrente de arco secundário e a tensão de restabelecimento transitória podem ser matematicamente obtidas pela análise do circuito apresentado na Figura 2.3. Para tanto, serão considerados os cenários de uma LT com e sem a presença de compensação em derivação, além da inclusão de reatores de neutro, cuja aplicação

em linhas longas e de alta tensão visa diminuir os efeitos da corrente de arco secundário, ao compensar o acoplamento capacitivo entre fases.

Figura 2.3: Representação dos acoplamentos de uma linha de transmissão.

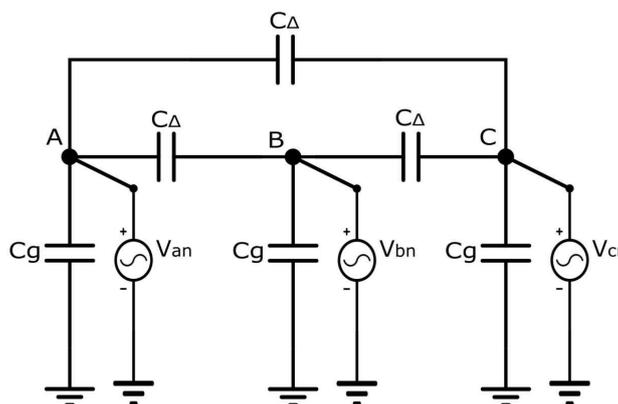


Fonte: (GODOY et al., 2012)

Apesar da existência dos acoplamentos indutivos e capacitivos mostrados na Figura 2.3, comumente a parcela indutiva é desprezada nas análises (L_{ab} , L_{bc} e L_{ca}), pelo fato de possuir menor contribuição para a manutenção da corrente de arco secundário (KIMBARK, 1964; ZEVALLOS, 2007).

Além disso, para as avaliações presentes neste capítulo, considera-se uma LT perfeitamente transposta sem perdas, sob condições equilibradas de tensão em ambos os terminais, adotando-se valores concentrados e iguais de capacitância da fase para a terra (C_g) e entre fases (C_{Δ}), sendo estes valores correspondentes à soma das grandezas distribuídas ao longo da linha. O circuito em questão, após tais simplificações, é apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4: Diagrama LT transposta com representação dos acoplamentos capacitivos.



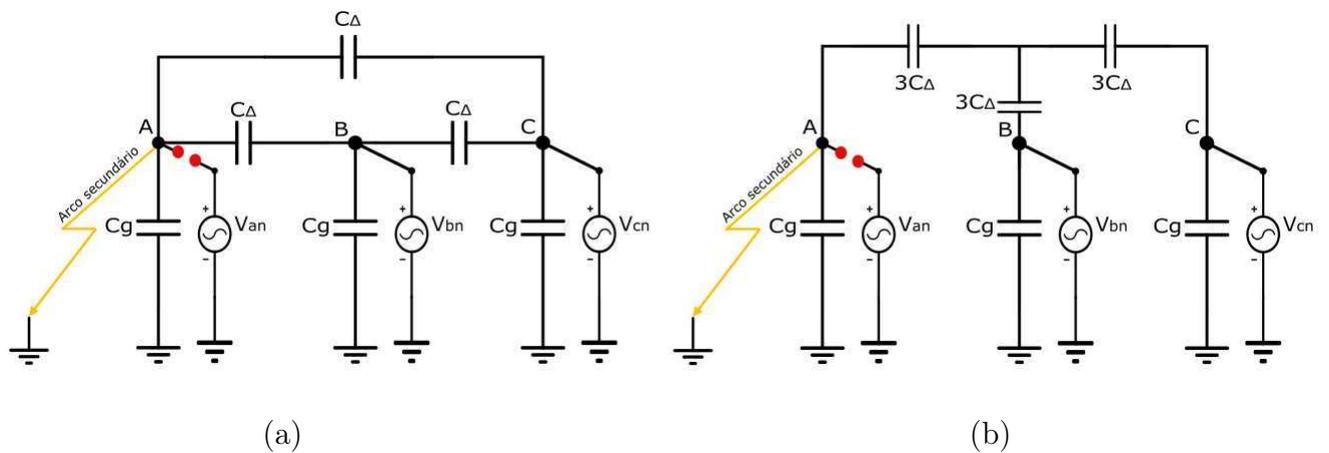
Fonte: Autoria Própria.

2.3.1 Linhas de Transmissão sem compensação em derivação

Mediante a ocorrência de uma falta, as grandezas elétricas do circuito na Figura 2.4 podem ser avaliadas com a construção da respectiva matriz admitância e inserção das condições de contorno durante o evento. Entretanto, optou-se por realizar tal análise com a obtenção do equivalente Thévenin sob o ponto de vista da fase em falta, possibilitando estimar a corrente de arco secundário em regime estacionário, além da tensão de restabelecimento transitória nos terminais do disjuntor de proteção.

A simplificação se dá a partir da premissa de uma ocorrência de falta AT e atuação da proteção monofásica, conforme ilustra a Figura 2.5 (a), onde os terminais da fase em aberto são destacados na cor vermelha e o arco secundário é representado na cor amarela. Na Figura 2.5 (b), mostra-se o mesmo circuito após a transformação Δ - Y do conjunto de capacitâncias mútuas C_{Δ} .

Figura 2.5: Diagrama LT transposta com acoplamentos capacitivos e atuação da proteção.



Fonte: Adaptado de (GODOY et al., 2012)

Para um sistema equilibrado de sequência positiva, as tensões podem ser descritas como mostrado nas equações 2.1, 2.2 e 2.3.

$$V_{an} = E. \quad (2.1)$$

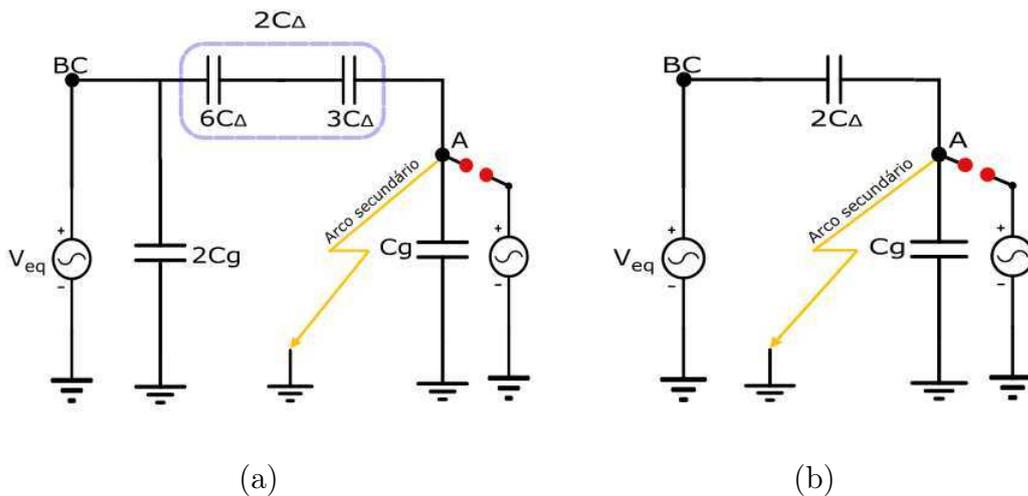
$$V_{bn} = a^2 E = -0,5E - j0,87E. \quad (2.2)$$

$$V_{cn} = a E = -0,5E + j0,87E. \quad (2.3)$$

A solução é obtida a partir do princípio da superposição, avaliando as componentes reais e imaginárias das fontes de alimentação, respectivamente. Conforme mostrado em Kimbark (1964), para uma manobra monofásica a parcela imaginária acaba sendo desprezada, por não contribuir para a corrente de arco secundário e para a tensão de restabelecimento transitória, pois $\text{Im}(V_{cn}) = -\text{Im}(V_{bn}) = j0,87E$, não propiciando uma diferença de potencial no circuito resultante.

Para a parcela real tem-se $\text{Re}(V_{bn}) = \text{Re}(V_{cn}) = -0,5E$, logo, o circuito equivalente pode ser obtido considerando ambos os pontos no mesmo potencial (B e C), conforme representação da Figura 2.6 (a), cujas capacitâncias podem ainda ser associadas de modo a se obter a simplificação mostrada na Figura 2.6 (b).

Figura 2.6: Diagrama LT transposta com acoplamentos capacitivos - circuito equivalente.



Fonte: Autoria Própria

Com o equivalente obtido encontra-se a equação que define, aproximadamente, a corrente de arco secundário em uma falta monofásica (equação 2.4), sendo esta efetivamente função da tensão do sistema, da frequência de operação e do comprimento da LT, cujo valor afeta a capacitância mútua equivalente (ESZTERGALYOS et al., 1992).

$$I_{arco} = V_{eq}j\omega 2C_{\Delta}. \tag{2.4}$$

Avaliando e substituindo a tensão equivalente ($V_{eq} = -0,5E$) resultante da ausência da fase A no sistema trifásico, pode-se reescrever a equação da seguinte forma:

$$I_{arco} = -Ej\omega C_{\Delta}, \quad (2.5)$$

em que E representa a tensão de fase do sistema [V], ω representa a frequência angular [rad/s] e C_{Δ} representa a capacitância mútua [F].

A tensão no terminal após a extinção do arco secundário é obtida aplicando-se um divisor de tensão capacitivo na Figura 2.6 (b). Logo, a expressão da tensão (V_r) para uma linha sem a presença de compensação reativa será determinada pela equação 2.6, sendo diretamente proporcional à tensão do sistema, dependente dos valores de capacitâncias C_{Δ} e C_g e não variando com o comprimento da LT (ESZTERGALYOS et al., 1992). Além disso, a tensão de restabelecimento do arco secundário possuirá um nível DC associado, com oscilação na frequência das tensões de alimentação e decaimento ao longo do tempo.

$$V_r = E \left(\frac{C_{\Delta}}{2C_{\Delta} + C_g} \right), \quad (2.6)$$

em que C_{Δ} e C_g também podem ser reescritos pelos respectivos valores de sequência positiva e zero.

$$C_{\Delta} = \frac{(C_1 - C_0)}{3}.$$

$$C_g = C_0.$$

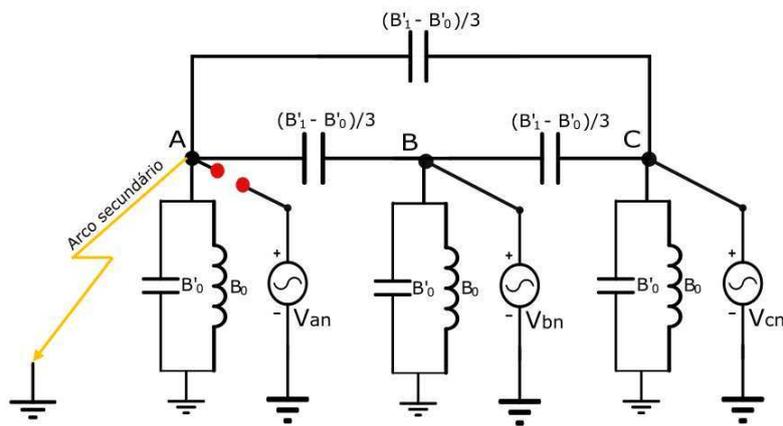
2.3.2 Linhas de Transmissão com compensação em derivação

A partir da representação da Figura 2.4, inclui-se um reator em cada uma das fases do sistema trifásico. Este reator é dimensionado de forma a compensar uma parcela da capacitância presente entre a fase e a terra, sendo normalmente adotado em linhas de alta tensão e longo comprimento, características de grande parcela das LTs brasileiras, para redução do efeito Ferranti (SOUZA, 2002; ZEVALLOS, 2007). Segundo disposto em (D'AJUZ et al., 1987) e ARAUJO e NEVES (2005), o efeito Ferranti faz com que a tensão na extremidade de uma LT seja superior à tensão no lado de geração, devido à corrente capacitiva mantida pela indutância série da linha, sendo assim necessário realizar um controle de tensão.

O circuito com a inserção dos reatores por fase é apresentado na Figura 2.7, bem como o

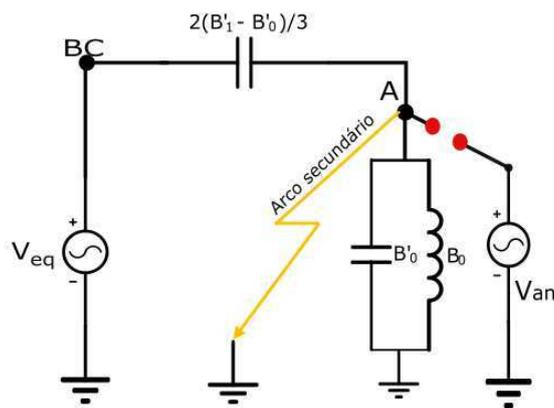
circuito equivalente na Figura 2.8, obtido seguindo os mesmos passos comentados na seção anterior. Para facilitar a manipulação das variáveis, dada a disposição em paralelo dos elementos, as capacitâncias de sequência positiva e zero da linha de transmissão encontram-se representadas pelas respectivas susceptâncias capacitivas (B'_1 e B'_0) e a indutância do reator representada pela susceptância indutiva (B_0).

Figura 2.7: Diagrama simplificado de uma LT Transposta com reatores em derivação após atuação da proteção.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.8: Circuito equivalente Thévenin (circuito com compensação em derivação).



Fonte: Autoria Própria.

No caso de LTs com compensação reativa em derivação, o valor da indutância do reator em conjunto com a capacitância equivalente da linha formam um circuito ressonante, cuja frequência natural interage com a frequência fundamental do sistema (IEEE Power Systems Relaying Committee, 1984; ESZTERGALYOS et al., 1992), modificando o formato da tensão

obtida pós extinção do arco elétrico, que agora passa a apresentar uma envoltória de menor frequência, citada na literatura como frequência de batimento (do inglês, *beat frequency*).

Para a linha compensada, a obtenção da tensão resultante após o arco extinguir-se se dá pelo mesmo procedimento, com um divisor de tensão no circuito equivalente, chegando na equação 2.7 a seguir (KIMBARK, 1986).

$$V_r = E \frac{(B'_1 - B'_0)}{2B'_1 + B'_0 - 3B_0}, \quad (2.7)$$

em que E representa a tensão de fase do sistema [V], B'_1 e B'_0 representam a susceptância capacitiva de sequência positiva e zero da LT [S], B_0 representa a susceptância indutiva do reator [S].

Ao observar a equação 2.7, pode-se interpretar o impacto da inserção do elemento indutivo na tensão resultante. Como o reator irá compensar parcialmente ou totalmente o efeito do capacitor entre a fase e a terra (C_g ou B'_0), sem alterar a contribuição mútua da susceptância capacitiva, a tensão nos terminais do sistema tende a ser maior do que no caso de LTs não compensadas (KIMBARK, 1964; ESZTERGALYOS et al., 1992), ocasionando sobretensões durante as manobras.

Com base na Figura 2.8 e na equação 2.5, percebe-se que a instalação de reatores de fase conectados ao sistema trifásico por si só não propicia uma vantagem significativa no que diz respeito a redução do tempo de extinção do arco secundário, visto que a capacitância mútua entre as fases, que possui contribuição direta na corrente, permanece inalterada. Logo, existem abordagens cujo objetivo é compensar indutivamente tal valor, reduzindo a amplitude da corrente de arco secundário e aumentando a probabilidade de extinção (CAMARA, 2010).

2.3.3 Linhas de Transmissão com compensação em derivação e reator de neutro

Em linhas de transmissão de longo comprimento e níveis de tensão elevados, onde o cenário não favoreça naturalmente a extinção do defeito em tempo hábil para o uso da manobra monofásica, devem-se aplicar técnicas para maximizar a probabilidade de extinção do arco secundário. Dentre estas, destacam-se o uso de chaves de aterramento rápido (HSGS, do inglês *High-Speed Grounding Switches*), esquema de reatores chaveados e reatores de neutro (HASIBAR et al.,

1981; ZEVALLOS, 2013).

Os métodos de reatores chaveados acabam se tornando uma opção em casos de LTs não transpostas, cujas capacitâncias entre fases sejam distintas e o método tradicional de 4 reatores (3 reatores de fase e 1 de neutro) não seja efetivo. A instalação de chaves de aterramento rápido, por sua vez, são propostas para os casos nos quais o reator de neutro não propicie uma redução na corrente ou quando a LT não demande a utilização de compensação em derivação, sendo um método efetivo na diminuição do tempo morto em linhas curtas, porém, acabam acarretando um aumento no custo do projeto (ZEVALLOS, 2013).

No Brasil, o uso de reatores de neutro para prover o religamento monofásico é mais comum que as demais técnicas, dado que as linhas de EAT presentes no SIN normalmente possuem especificação de reatores de fase para controle de tensão, como mostram diversas notas técnicas disponibilizadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em estudos de expansão do sistema de transmissão no SIN (EPE, 2022), tornando esta uma opção economicamente viável, majoritariamente, dada a existência prévia dos demais equipamentos. Entretanto, a escolha dos valores para reatores de neutro apresentam fatores limitantes, sendo necessárias avaliações para determinar os níveis de tensão ao qual o equipamento será submetido, seu nível de isolamento básico (do inglês, *Basic Insulation Level*) e priorizar soluções que não demandem fabricação especial, cujo resultado direto é o aumento de custo.

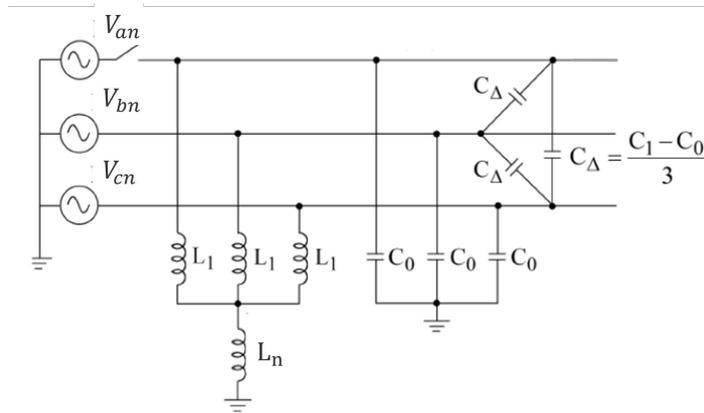
Neste trabalho, devido à comprovada maior utilização, será abordado somente o método de reator de neutro tradicional como forma de mitigar a corrente de arco secundário.

2.3.3.1 Reator de neutro como método de extinção de Arco Secundário

Nesta abordagem, é realizada a inserção de um reator adicional ao conjunto apresentado na subseção anterior, conectado entre o neutro do banco de reatores e a terra (PORTELA; OLIVEIRA, 1977). Este reator (L_n), representado na Figura 2.9, caso especificado de forma adequada, atua de forma a reduzir a influência da reatância capacitiva equivalente entre fases ($C_1 - C_0$), como pode ser melhor visualizado após a transformação Y - Δ da Figura 2.10, que deixa clara a disposição de uma componente indutiva (L_m) em paralelo com a capacitância mútua da linha. Os valores de indutância após a transformação (L_0 e L_m) são apresentados

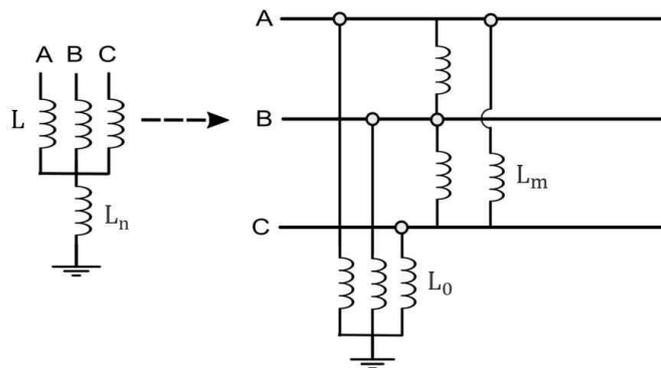
nas equações 2.8 e 2.9, respectivamente.

Figura 2.9: LT transposta com compensação em derivação e reator de neutro.



Fonte: Adaptado de (JAFARIAN; ESKANDARI; SANAYE-PASAND, 2018)

Figura 2.10: Representação do esquema para conexão do reator de neutro e transformação estrela-delta.



Fonte: (JIAXING et al., 2018)

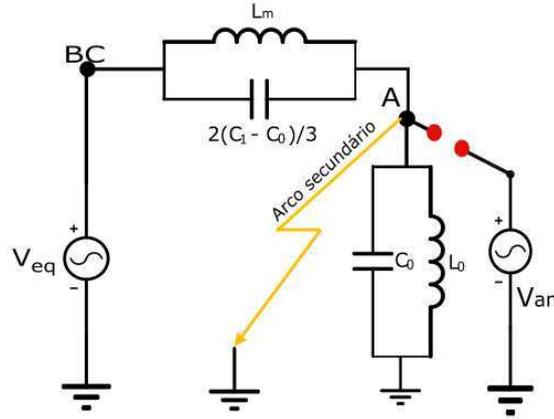
$$L_0 = L_1 + 3L_n. \tag{2.8}$$

$$L_m = \frac{L_1(L_1 + 3L_n)}{2L_n}. \tag{2.9}$$

Em termos teóricos, o uso desta técnica seria capaz de compensar completamente a capacitância mútua e anular a corrente de arco secundário, entretanto, imprecisões no ajuste, restrições econômicas, presença de harmônicos, aspectos construtivos e perdas tornam inviável tal execução (KIMBARK, 1964), além do fato de a corrente não ser completamente composta pela contribuição capacitiva adotada como simplificação.

O diagrama do circuito equivalente com a influência do reator de neutro inserido pode ser visualizado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Circuito equivalente de Thévenin (com reator de neutro).



Fonte: Adaptado de (ZHALEFAR; ZADEH; SIDHU, 2015)

A oscilação apresentada na tensão de restabelecimento do arco secundário da fase será dada pela composição da frequência fundamental do sistema, frequência de ressonância do conjunto $L_m C_\Delta$ e pela frequência ressonante do conjunto $L_0 C_0$, e sua expressão após extinção do arco secundário é mostrada na equação 2.10 (ZHALEFAR; ZADEH; SIDHU, 2015). Na prática, em circuitos contendo 4 reatores, normalmente observa-se que a tensão nos terminais após a extinção do arco apresenta valores de amplitude menores do que o conjunto de 3 reatores, possuindo uma frequência de batimento menor.

$$V_r = E \left(\frac{Z_{eq1}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} \right), \quad (2.10)$$

em que

$$Z_{eq1} = \left(\frac{1}{j\omega C_0} \right) \parallel (j\omega(L_1 + 3L_n)).$$

$$Z_{eq2} = \left(\frac{3}{j\omega 2(C_1 - C_0)} \right) \parallel \left(\frac{j\omega L_1(L_1 + 3L_n)}{2L_n} \right).$$

Dessa forma, o reator de neutro é utilizado de modo a possibilitar que a tensão nos terminais do sistema, bem como as correntes sustentadas durante o curto-circuito sejam devidamente reduzidas, propiciando condições mais favoráveis ao sucesso da manobra de religamento monofásica.

2.3.3.2 Procedimento para escolha do reator de neutro

Esta subseção dedica-se a apresentar o procedimento tradicional abordado na literatura para o escolha de reatores de neutro, proveniente do desenvolvimento matemático presente em Kimbark (1964). No texto, o autor ressalta a representação das susceptâncias capacitivas relativas à LT com uso de aspas simples ('), de modo a diferenciar dos elementos indutivos provenientes dos reatores, que possuem a representação sem aspas. Desta forma, esta notação é adotada a seguir.

Para um determinado grau de compensação F desejado para a LT, a susceptância indutiva do reator *shunt* (B_1) e a susceptância capacitiva total da linha de transmissão (B'_1) são relacionadas como apresentado na equação 2.11.

$$B_1 = FB'_1. \quad (2.11)$$

em que B_1 e B'_1 podem ser escritos conforme as equações 2.12 e 2.13, em função da capacitância e indutância de sequência positiva, comprimento e frequência angular.

$$B_1 = \frac{1}{\omega L_1}. \quad (2.12)$$

$$B'_1 = \omega C_1 l. \quad (2.13)$$

Kimbark (1964) afirma que para uma neutralização do acoplamento capacitivo e a consequente supressão da falta, a diferença das componentes de sequência positiva e zero da indutância dos reatores deve ser igual à diferença das componentes capacitivas. Logo, tem-se a equação 2.14.

$$B_1 - B_0 = B'_1 - B'_0. \quad (2.14)$$

Adicionando o grau de compensação da equação 2.11 em 2.14, encontra-se a expressão para a susceptância indutiva de sequência zero do reator.

$$B_0 = B'_0 - (1 - F)B'_1. \quad (2.15)$$

Dado que a indutância do reator de neutro pode ser descrita em termos das componentes de sequência zero e positiva, conforme equação 2.16, seu respectivo valor em susceptância pode ser reescrito na equação 2.17.

$$L_n = \frac{L_0 - L_1}{3}. \quad (2.16)$$

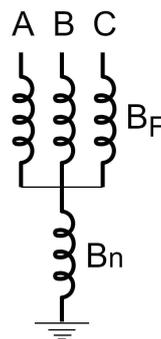
$$B_n = \frac{3B_0B_1}{B_1 - B_0}. \quad (2.17)$$

Assim, para um esquema de reatores em estrela apresentado na Figura 2.12, escrevem-se as susceptâncias indutivas de fase (B_F) e de neutro (B_n) em termos de valores da LT, ao se substituir as equações 2.11 e 2.15 em 2.17, resultando nas equações 2.18 e 2.19, respectivamente (KIMBARK, 1986).

$$B_F = B_1 = FB'_1. \quad (2.18)$$

$$B_n = \frac{3B_0B_1}{B_1 - B_0} = \frac{3B'_1F(B'_0 - (1 - F)B'_1)}{B'_1 - B'_0}. \quad (2.19)$$

Figura 2.12: Esquema de 4 reatores (com reator de neutro).



Fonte: Autoria Própria.

Além disso, com base na equação 2.19, Kimbark (1964) indica um grau mínimo de compensação da LT para que o uso de um reator de neutro seja necessário para a supressão da falta, sendo este determinado pela equação 2.20.

$$F_{min} = \frac{B'_1 - B'_0}{B'_1} = 1 - \frac{B'_0}{B'_1}. \quad (2.20)$$

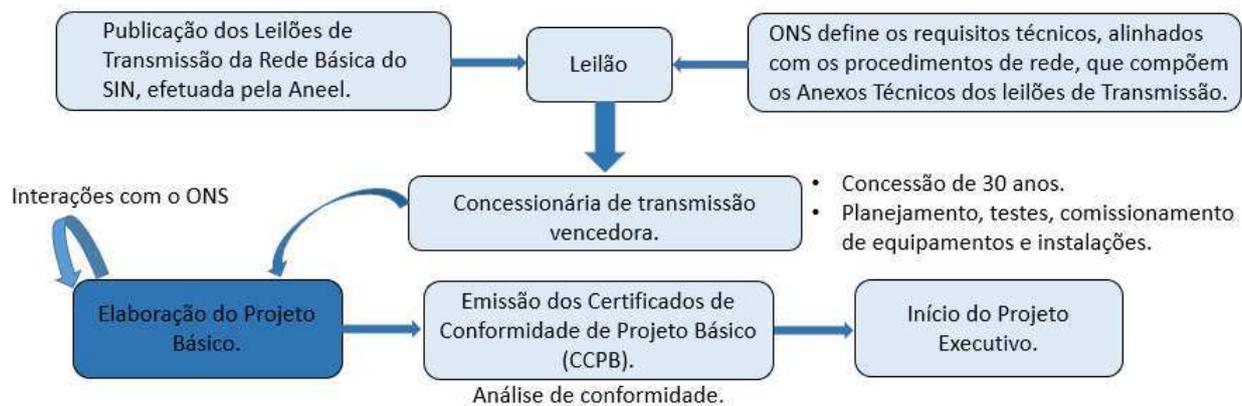
Este procedimento permite de fato obter um referência para o valor do reator de neutro, entretanto, inúmeros estudos posteriores mostram que a avaliação da extinção de arco secundário demanda uma análise mais aprofundada do comportamento do sistema durante cenários de operação, não se limitando as características elétricas da LT sob estudo. Assim, outros aspectos, apresentados posteriormente na revisão bibliográfica, também passam a ser utilizados para determinar o equipamento adequado para o circuito.

2.4 PROJETO BÁSICO

Projeto Básico (PB) é o nome dado a uma das etapas do processo de comissionamento de novas linhas de transmissão no SIN, contemplando as diretrizes para a realização de estudos elétricos, além da especificação de instalações e equipamentos (ONS, 2013). A elaboração deste documento é responsabilidade do agente de transmissão vencedor dos leilões realizados pela ANEEL, devendo este seguir as recomendações listadas nos módulos dos Procedimentos de Rede, disponibilizados pelo ONS.

Os resultados das avaliações presentes no PB são submetidos pelo agente de transmissão ao ONS durante o planejamento de novas instalações, para verificação de conformidade e requisitos, gerando os denominados Certificados de Conformidade de Projeto Básico (CCPB), para posterior envio e aprovação pela ANEEL (ONS, 2021b), permitindo assim início do projeto executivo. Na Figura 2.13 é ilustrado de forma resumida o procedimento comentado.

Figura 2.13: Resumo do procedimento para novas LTs.



Fonte: Autoria Própria.

Neste contexto, apesar de majoritariamente as linhas de transmissão e os demais equipamentos trabalharem em regime permanente, estes estudos devem ser considerados para os piores cenários operacionais, com ênfase nos transitórios eletromagnéticos, correspondentes aos esforços elétricos impostos durante ocorrência de manobras e contingências, como em casos de energizações, rejeições de carga ou religamentos pós curto-circuitos, por exemplo.

2.4.1 Religamentos Automáticos

De acordo com (ONS, 2021a), os estudos de religamentos automáticos no SIN apresentam os seguintes objetivos:

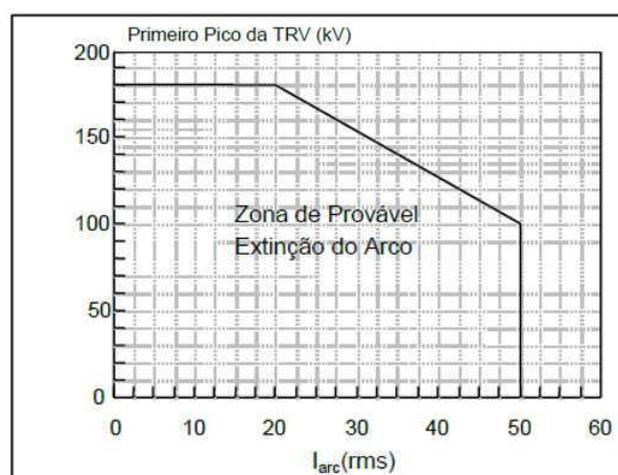
- Garantir a estabilidade eletromecânica das máquinas síncronas.
- Diminuir esforços mecânicos nos eixos das unidades geradoras.
- Avaliar se as sobretensões ocorridas durante as manobras encontram-se dentro de limites que garantam a integridade dos equipamentos envolvidos.
- Possibilitar a reenergização automática das LTs com tempo inferior ao procedimento manual.
- Avaliar a perspectiva de sucesso no religamento, definindo o tempo morto necessário.

Especificamente ao se tratar acerca da manobra monopolar, os requisitos e diretrizes dos Procedimentos de Rede definem a necessidade da realização de estudos que cubram a faixa de frequência de 56 a 66 Hz, com o objetivo de identificar possíveis condições de ressonância na fase aberta e confirmar o atendimento dos critérios relativos à amplitude da corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento transitória que permitam a execução da manobra. Nos tópicos a seguir, são listados os critérios considerados para avaliação da extinção do arco secundário, sendo estes adotados a partir do tempo morto encontrado para o sistema em estudo.

2.4.1.1 Critério 1 - Extinção do arco secundário no religamento monopolar

Em sistemas cujo tempo morto seja compreendido em até 500 *ms*, o padrão disposto pelo ONS utiliza a referência (BALOSSI; MALAGUTI; OSTANO, 1966), obtida com testes experimentais, cuja probabilidade de extinção do arco está associada ao valor eficaz do último pico de corrente de arco secundário e pelo valor do primeiro pico de tensão de restabelecimento transitória (TRT). Considera-se assim que o religamento possui alta probabilidade de sucesso caso o par (V_p, I_{arco}) encontre-se dentro dos limites presentes na curva indicativa da Figura 2.14.

Figura 2.14: Curva indicativa para análise da extinção da corrente de arco secundário (tempo morto ≤ 500 *ms*)

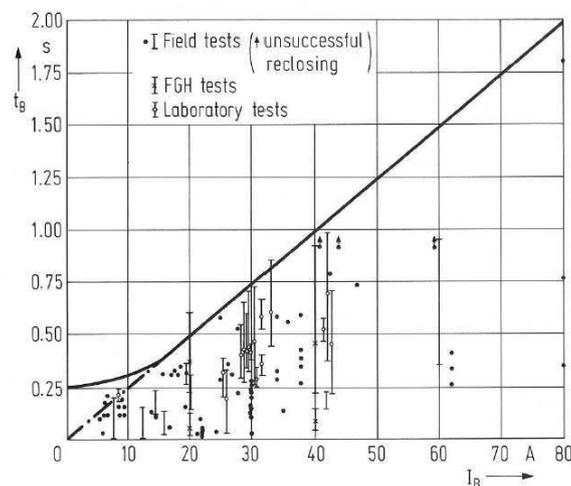


Fonte: (BALOSSI; MALAGUTI; OSTANO, 1966)

2.4.1.2 Critério 2 - Extinção do arco secundário no religamento monopolar

Nos cenários em que tecnicamente seja verificado que a duração do tempo morto ultrapassa 500 *ms*, deve-se investigar a aplicação de métodos de mitigação no sistema, tais como a inclusão de reatores de neutro ou chaves de aterramento rápido. Se for comprovada a inviabilidade de atendimento ao requisito de tempo, utiliza-se como base uma segunda curva de referência experimental (Figura 2.15), para linhas até 750 kV, na qual são relacionados o tempo morto e o valor eficaz do último pico de corrente de arco secundário.

Figura 2.15: Curva indicativa de tempo morto para extinção do arco secundário versus valor eficaz da corrente de arco secundário.



Fonte: (HAUBRICH; HOSEMANN; THOMAS, 1974)

Com base neste critério, os estudos devem possibilitar a extinção do arco com tempo morto de até 1,25 *s*, correspondente a uma corrente de 50 A no gráfico. Se esta condição não for possível de ser atendida, deve-se sugerir o tempo morto relacionado ao valor da corrente eficaz obtida. Por fim, para correntes acima de 80 A, a conclusão da impossibilidade da garantia de extinção do arco deve ser adotada (ONS, 2021a).

É importante notar que tal curva trata-se de uma aproximação, obtida a partir de um conjunto restrito de parâmetros de um estudo da década de 70, sendo ainda utilizado pelo setor por indisponibilidade de informações mais recentes (ONS, 2013). Logo, apesar da indicação ser recomendada no Procedimentos de Rede, deve-se ter em mente um grau de incerteza para generalização de sua utilização em qualquer sistema, devendo-se priorizar a análise de métodos que permitam o atendimento ao critério 1.

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo fornece conceitos acerca de religamentos automáticos, explicitando as diferenças entre a manobra tripolar e monopolar, além de apresentar as etapas existentes durante a realização da manobra. Em seguida, dá-se foco aos cálculos para obtenção da aproximação da corrente de curto-circuito de arco secundário e TRT, para LTs sem a presença de compensação reativa, com compensação reativa e com compensação reativa em conjunto com reatores de neutro. Por fim, mostra-se o desenvolvimento matemático tradicional para se obter reatores de neutro e os critérios previstos pela norma para avaliação da extinção da corrente de arco secundário.

No capítulo seguinte será apresentada a revisão bibliográfica relacionada ao tema do presente trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso de reatores de neutro para mitigação da corrente de arco secundário, fenômeno inerente ao processo de religamento monofásico. Os trabalhos abordados mostram importantes diretrizes acerca do tema, trazendo a tona discussões sobre os conceitos matemáticos, análises de sensibilidade, soluções para diferentes contextos e metodologias para a aplicação dos reatores.

3.1 UTILIZAÇÃO DE REATORES DE NEUTRO

O uso de reatores de neutro para aumentar a confiabilidade da manobra monofásica é um tema cujas discussões datam desde meados de 1960. Nos trabalhos pioneiros de Knudsen (1962) e Kimbark (1964), são abordados pontos referentes a como disposição de um arranjo de reatores possibilita a supressão da corrente de arco secundário, ao neutralizar parcialmente os acoplamentos mútuos presentes em uma LT transposta. Após uma breve comparação de diferentes esquemas, mostra-se com maiores detalhes o conjunto composto por 4 reatores, sendo este comumente adotado até os dias atuais. Também é apresentado o procedimento matemático para obtenção do valor do reator de neutro. Os autores discutem os fatores mais importantes para o sucesso da manobra, como amplitude da corrente de arco secundário, amplitude e taxa de crescimento da TRT e aspectos econômicos, mostrando que a mitigação da falta pode ocorrer com um baixo custo adicional, dada a comum presença de compensação reativa em linhas de transmissão de alta tensão.

O primeiro registro da viabilidade do religamento monopolar em conjunto com reatores de neutro, para linhas de 500 kV, é atribuído ao trabalho de Edwards et al. (1971). Durante aproximadamente o intervalo de 1 ano, os autores realizaram testes em um trecho de LT de 150 km (Paradise-Davidson), cujos resultados comprovaram a efetividade do esquema de 4 reatores para extinção do arco. O trabalho traz informações detalhadas do procedimento e

instrumentação utilizada para permitir testes durante operação, podendo servir de guia para aplicações similares. Dentre os 13 testes catalogados, o religamento obteve sucesso em 9 deles com tempo de até 500 *ms*. Mostra-se que uma das falhas foi decorrente da retirada proposital do esquema de compensação, não possibilitando a extinção do arco em tempo suficiente, ao passo que as 3 restantes ocorreram por falha no funcionamento dos relés de proteção.

Anos após, Haubrich, Hosemann e Thomas (1974) apresentam uma discussão sobre a influência da presença de transposição e diferentes graus de compensação na LT. Além disso, testes laboratoriais e de campo foram executados, sendo feita uma avaliação de sensibilidade de parâmetros referentes ao arco elétrico, como velocidade do vento, amplitude da corrente do curto e TRT resultante, comprimento do arco elétrico e duração do curto-circuito, cujos resultados embasam a curva indicativa (Figura 2.15) utilizada frequentemente como critério para análise de extinção do arco secundário, inclusive considerada pelo ONS. Além de outras avaliações, os autores indicam ainda a possibilidade de redução do tempo de duração do arco, ao limitar o comprimento de uma LT com base na curva proposta, a partir do tempo morto desejado e esquema de compensação de 4 reatores, mostrando que para um mesmo nível de tensão, é possível se obter linhas com comprimentos superiores ao caso não compensado, que atendam aos critérios de extinção.

Em circuitos múltiplos, dada a quantidade de fases envolvidas no sistema, o uso da manobra monopolar tende a ser mais complexo. Este tema é discorrido em Kimbark (1976), onde se mostra a aplicação de um sistema de compensação para circuitos duplos. As dificuldades oriundas da presença de 15 capacitâncias entre fases distintas são discutidas e o método é justificado apresentando como obter os valores adequados dos reatores. A solução é proposta para uma linha de circuito duplo de 735 kV, com possível extensão para LTs de 500 kV. Em casos onde o método não reduza as correntes de forma suficiente, propõe-se a inclusão de chaves para seccionar a linha, cuja atuação se dá após a abertura dos terminais dividindo a LT em diferentes seções. O método traz certa complexidade na aplicação, dado que pode ser necessário adotar um conjunto de até 9 reatores (incluindo neutro) e 3 capacitores, para adequar a aplicação e compensar os acoplamentos capacitivos que majoritariamente mantêm a corrente sustentada.

Em linhas não transpostas, a aplicação do esquema convencional de 4 reatores pode não

apresentar resultados satisfatórios, visto que as capacitâncias presentes entre as fases são distintas. Com base nisso, Fakheri, Ware e Shperling (1978) e posteriormente Shperling e Fakheri (1979) propuseram um esquema manobrável de um, dois ou três conjuntos de reatores, aplicados em combinação com o esquema tradicional de 4 pernas. A solução se baseia na inclusão de 4 chaves que são coordenadas juntamente aos disjuntores de proteção, de forma a compensar a diferença entre as capacitâncias mútuas. Os autores ainda apresentam uma metodologia para definição do valor ótimo do reator de neutro, com base nas componentes eletrostáticas e eletromagnéticas do arco elétrico, cuja aplicação para uma LT de 765 kV apresentaram resultados promissores, restringindo o valor da corrente de curto para faixas de compensação em derivação e comprimento da LT. Devido ao uso de chaves manobráveis, este tipo de abordagem levanta algumas discussões no que diz respeito ao aumento da complexidade e custo de implementação da proposta.

Em 1992, Esztergalyos et al. (1992) publicaram no IEEE Committee Report um compilado de informações de auxílio para o uso de manobras monofásicas de religamento, listando soluções a serem utilizadas em conjunto com o método, discutindo seus benefícios e o desempenho de cada uma delas. Dentre os diversos temas abordados, mostra-se que apesar do conjunto de 4 reatores proposto por Kimbark (1964) ter restrições por não ser flexível e manobrável como as demais propostas, ainda permanece como a opção com menor complexidade e custo.

As sobretensões transitórias constituem um dos mais importantes focos de estudo durante a aplicação de manobras monopulares. Zanetta, Tahan e D'Ajuz (1993), por exemplo, avaliam por meio de simulações computacionais os efeitos da ocorrência de pólos presos, ressonância e tensões induzidas em linhas paralelas de 500 kV com a presença de reatores de neutro. São comentados os valores adequados para as torres convencionais e compactas estudadas definindo a viabilidade da aplicação do religamento monopolar diferentes condições de fluxo de potência. Abordagem semelhante é encontrada em Atmuri et al. (1994), onde os resultados das sobretensões ocasionadas em uma linha paralela de 500 kV desenergizada são discutidos. Mostra-se que a inserção do reator de neutro atua de modo a deslocar o ponto de possível ressonância, diminuindo consideravelmente as sobretensões. Sem a presença do reator de neutro puderam ser observadas tensões da ordem de 0,8 pu para alguns níveis de compensação, ao passo que com o reator as tensões induzidas foram limitadas a 0,04 pu na linha desenergizada. Em ambos

os trabalhos são realizadas discussões pertinentes acerca da proteção de tais reatores, no que diz respeito à escolha da classe de tensão, nível de isolamento básico (BIL) requerido e valores de corrente/tensão máximos do equipamento.

O trabalho proposto por Tavares e Portela (2004) discute a importância de se otimizar parâmetros da LT para obtenção de um melhor custo-benefício na operação. São realizados estudos sistemáticos de energização à frequência fundamental para possibilitar uma análise de sensibilidade da corrente de arco secundário e TRT, encontrando uma faixa de valores adequados para os reatores que viabilizem a aplicação da manobra monopolar. Tal metodologia baseia-se na relação entre a impedância homopolar e não-homopolar do banco de reatores (denominada razão r_h), cobrindo diferentes pontos de localização da falta. No sistema em estudo (420 kV e 865 km), as simulações de energização e ocorrências de falta durante operação no domínio do tempo, comprovaram a redução da corrente de arco secundário e TRT para valores passíveis de sucesso no religamento monopolar, além de aferir a obrigatoriedade da presença do reator no estudo de caso. As avaliações presentes no estudo consideram somente um nível de compensação em derivação para a LT (80%), não incluem a representação do arco elétrico nas análises, bem como não foram notadas informações acerca dos esforços impostos ao reator de neutro dimensionado.

Em Nayak et al. (2006), são apresentados os conceitos para determinação de reatores de neutro em circuitos duplos. O reator de neutro é determinado a partir de variações no valor da reatância indutiva (0 - 5000 Ω), considerando possíveis situações de ressonância que possam vir a causar sobretensões no sistema. Para o circuito modelado (400 kV e 350 km), são feitas análises de tensões e correntes máximas impostas ao reator escolhido, de forma a identificar o nível de isolamento adequado. A análise de sensibilidade inclui variações no fator de potência, comprimento da LT e fluxo de potência, onde concluem que o aumento do comprimento da linha e do fator de potência ocasionam valores mais elevados de corrente de arco secundário, ao passo que o aumento do fluxo de potência diminui a amplitude da corrente de arco secundário observada. O estudo não aborda conceitos relativos a diferentes pontos de aplicação da falta e graus de compensação distintos.

Em Zadeh, Sanaye-Pasand e Kadivar (2008), os autores fazem um estudo de transitórios eletromagnéticos para avaliar o desempenho do uso de reatores de neutro para linhas trans-

postas e não transpostas, além de elencar limitações físicas e econômicas, considerando como base resultados dos métodos tradicionais em regime permanente. Mostra-se que o nível de isolamento básico (BIL) necessário para o reator decresce ao passo que a compensação aumenta, logo, a aplicação de reatores de neutro em linhas com menores compensações pode tornar-se economicamente inviável pelo custo necessário do equipamento. Para os diferentes modelos de arco elétrico utilizados, conclui-se que a alteração da reatância dentro de uma faixa de valores não ocasiona mudanças significativas no tempo de extinção do arco, possibilitando a adequação da especificação do reator mediante disponibilidade e custo, sem prejuízos no desempenho. As simulações apresentadas levam em conta somente um ponto de aplicação da falta, considerado este o pior cenário pelos autores.

Zevallos e Tavares (2009) apresentam uma forma de se obter valores adequados de reatores de neutro aplicados a linhas típicas do sistema de transmissão brasileiro. O método utiliza a relação entre as reatâncias homopolar (X_0) e não homopolar (X_d) para obter o menor valor de corrente de arco secundário em regime, para faltas simuladas a cada 20 km da LT em estudo, possibilitando encontrar um reator “ótimo”, aplicado posteriormente nas demais análises. Os resultados para as LTs de 345, 500 e 745 kV mostram sucesso na redução da corrente de arco secundário, entretanto, para linhas consideradas muito longas, o método necessita de alterações para funcionamento, com adição de compensação série e redistribuição da compensação *shunt* em pontos ao longo da LT.

Baseado no fato que é economicamente inviável a definição de reatores de neutro específicos para diferentes LTs, Jafarian, Eskandari e Sanaye-Pasand (2016) propõem um trabalho cujo foco é a definição de um valor de reatância sub-ótimo, que independe do comprimento da LT e leva em consideração a relação entre as capacitâncias de sequência positiva e zero, além do valor da indutância do reator *shunt*. Esta abordagem é posteriormente estendida para circuitos duplos em Jafarian, Eskandari e Sanaye-Pasand (2018). O método utiliza a intersecção entre as curvas que relacionam a TRT e X_n , para diferentes comprimentos de LT (120/150/180 km), de modo a encontrar o valor adequado de reatância para o neutro. Para sistema em estudo, baseado em uma LT real de 400 kV, o reator dimensionado com a técnica proposta necessitou de uma reatância menor (tradicional = 28500 Ω e proposto = 827 Ω), cujo nível de isolamento básico (BIL) se manteve baixo para graus de compensação distintos e foi capaz de prover o

religamento monofásico em tempo hábil para as LTs de 400 kV do Iran. Entretanto, o novo reator ocasiona um aumento no tempo de extinção do arco, que deve ser levado em conta a depender das restrições do sistema no qual o método será utilizado.

O foco do estudo apresentado por Eskandari e Jafarian (2017) é analisar as sobretensões que ocorrem nas fases isoladas devido à ressonância em série durante a manobra monopolar. É proposto um modelo trifásico de reatores com acoplamento magnético entre si (considerando $L_1 \neq L_0$) e são deduzidas as fórmulas correspondentes. Os autores fazem a escolha do valor do reator de neutro e determinam uma faixa de valores, na qual não seriam observadas sobretensões na fase em aberto. Como conclusão, tem-se que nos casos onde o acoplamento magnético entre fases dos reatores em derivação não seja desprezível, ocorrem sobretensões em uma maior faixa de graus de compensação. Por fim, também verificam que para graus reduzidos de compensação na LT, o reator calculado da forma analítica tradicional teria um valor consideravelmente elevado, bem como uma necessidade maior de isolamento, mostrando que a otimização apresentada pode proporcionar menores custos econômicos.

Nos últimos anos, percebem-se ainda esforços para buscar melhorar o processo de extinção do arco secundário em multi-circuitos, com a aplicação de algoritmos de otimização (NSGA-II) para projetos de torres em linhas de transmissão em Jhair, Tavares e Gole (2021) e propostas de novas estruturas para reatores de neutro em Sarmiento, Tavares e Gole (2021). Neste último trabalho, devido à complexidade da solução apresentada para uma maior quantidade de circuitos, os autores utilizam processamento paralelo da rotina implementada em python para obter os valores otimizados dos reatores, indicando sucesso no procedimento com tempos de extinção até 46% menores do que o método tradicional, contando também com a representação do arco elétrico.

Na Tabela 3.1 a seguir são compiladas, de forma resumida, algumas informações acerca dos trabalhos presentes neste capítulo. Dá-se foco especialmente às características dos sistemas tomados como base pelos autores, bem como a aspectos utilizados durante os estudos para verificações de sensibilidade da corrente de arco secundário e TRT.

Tabela 3.1: Resumo da revisão bibliográfica.

Autor(es)	Tipo de circuito	Transposição (T/NT) ⁴	Utilização arco elétrico	Aspectos Abordados ³			
				Compensação <i>shunt</i>	Carregamento	Localização da falta	Comprimento da linha
(KNUDSEN, 1962) ¹ e (KIMBARK, 1964) ¹	Simples	T	-	-	-	-	-
(HAUBRICH; HOSEMAN; THOMAS, 1974) ¹	Simples e Duplo	T	X	X	-	-	X
(KIMBARK, 1976)	Duplo	T	-	X	X	-	-
(FAKHERI; WARE; SHPERLING, 1978) e (SHPERLING; FAKHERI, 1979)	Simples	NT	-	X	X	X	X
(ESZTERGALYOS et al., 1992) ¹	Simples e Duplo	-	-	-	-	-	-
(ZANETTA; TAHAN; D'AJUZ, 1993) ² e (ATMURI et al., 1994) ²	Duplo	-	-	X	-	X	-
(TAVARES; PORTELA, 2004) ¹	Simples	-	-	-	X	X	-
(NAYAK et al., 2006)	Duplo	-	-	-	X	-	X
(ZADEH; SANAYE-PASAND; KADIVAR, 2008)	Simples	T e NT	X	X	-	X	-
(ZEVALLOS; TAVARES, 2009)	Simples	-	-	X	-	X	X
JAFARIAN; ESKANDARI; SANAYE-PASAND (2016, 2018)	Simples e Duplo	T	X	X	-	X	X
(ESKANDARI; JAFARIAN, 2017)	Simples	T e NT	-	X	-	-	X
(SARMIENTO; TAVARES; GOLE, 2021)	Múltiplo	T	X	-	-	X	-

¹ Trabalhos voltados para fundamentação teórica, recomendações acerca do tema ou técnicas de mitigação de arco secundário.

² Trabalhos que discutem ressonâncias nas análises.

³ Trabalhos que realizam algum tipo de variação nas grandezas mencionadas.

⁴ NT = Linha não transposta/ T = Linha transposta.

Fonte: Autoria Própria.

3.1.1 Considerações Finais sobre a Revisão Bibliográfica

Desde suas primeiras aparições na literatura, a abordagem contendo o conjunto de 4 reatores foram exploradas em distintas situações, com foco principal em auxiliar na extinção da corrente de arco secundário e, posteriormente, também tornou-se necessária a avaliação do desempenho da técnica sob outros aspectos, como o impacto da presença dos reatores em linhas adjacentes e ressonâncias ou sobretensões durante operação normal ou durante contingências.

Apesar de constituir o cenário ideal, realizar uma especificação de reator de neutro para cada LT não é uma tarefa economicamente viável e não foi identificado na literatura um método universal que seja capaz de abranger as diferentes configurações possíveis. Por isso, muitas abordagens acabam generalizando uma solução para um conjunto de LTs, por meio de estudos realizados para um sistema específico, assumindo-se uma aproximação satisfatória que cumpra os requisitos regulamentados. Tais estudos são importantes pelo fato de identificar limitações e faixas operacionais, restritas a um conjunto de características conhecidas, observando possíveis cenários que possam causar danos ao sistema, além de questões técnicas voltadas à especificação do equipamento em si.

Verifica-se ainda que de forma geral, para problemas relacionados ao arco secundário, a aplicação do esquema tradicional de 4 reatores é um assunto bem consolidado, sendo dentre as diversas opções mencionadas a alternativa mais difundida para LTs de alta tensão e longo comprimento.

Ao longo dos anos, a formulação analítica presente em Kimbark (1964) passou a ser menos utilizada ou muitas vezes adotada com uma estimativa inicial válida, dando cada vez mais espaço a escolha do reator baseado em uma análise de sensibilidade mais ampla, que considere uma quantidade maior de cenários operacionais e disposição dos elementos envolvidos, para ao fim, propiciar menores solicitações elétricas aos equipamentos e ao sistema, além de obviamente buscar prover um custo-benefício aceitável para a solução, que justifique sua implementação. Apesar da manutenção dos conceitos apresentados nos trabalhos iniciais do tema, percebem-se problemas nos resultados da formulação para níveis de compensação reduzidos, que ocasionam elevados valores de reatância. Dessa forma, outras propostas foram desenvolvidas, como por exemplo a apresentada em Jafarian, Eskandari e Sanaye-Pasand (2016), que propicia de fato

valores reduzidos para X_n . Contudo, essa abordagem também impõe restrições relacionadas ao nível de compensação reativa e ao tempo morto necessário para sua aplicação. A presente pesquisa tem como objetivo investigar estratégias para contornar essas restrições e aprimorar o processo de escolha de reatores de neutro.

Por fim, outro ponto interessante a se verificar diz respeito à utilização de modelos realísticos de representação do arco elétrico. Obviamente, quanto maior o detalhamento matemático na modelagem do fenômeno a ser discutido, bem como sua interação com o restante do sistema elétrico, mais fiel ao comportamento real serão os resultados. Entretanto, o estabelecimento e uso de modelos de arco elétrico dependem de características específicas do sistema sob avaliação e parâmetros do ambiente cujas obtenções não são triviais, além do fato de serem incluídas ponderações referentes a conceitos físicos como balanço de energia e massa, em modelos mais complexos. Logo, justifica-se o fato da maioria dos estudos apresentados optarem por representar a falha elétrica a partir de um elemento resistivo, sendo este tipo de simplificação comumente aceita, inclusive por órgãos como o ONS em suas recomendações dos Procedimentos de Rede, sem que os resultados percam sua representatividade mediante a avaliação da extinção do curto-circuito.

METODOLOGIA

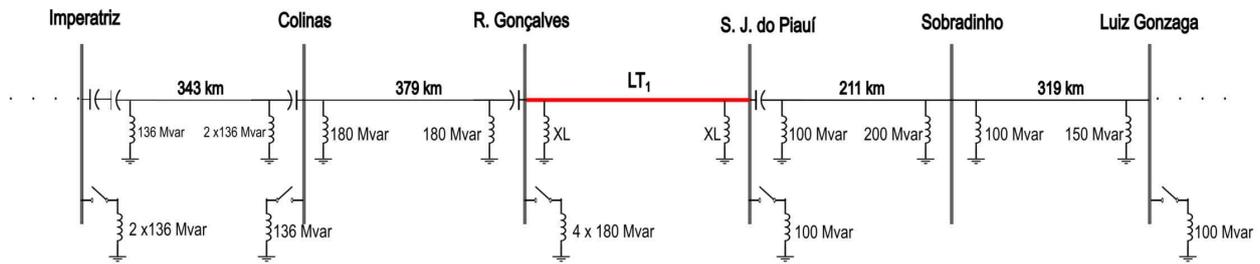
Este capítulo se destina a apresentar um detalhamento dos parâmetros de simulação empregados na análise paramétrica, além dos dados do sistema que servem como base para as simulações. Além disso, apresentam-se as etapas para realização da análise de sensibilidade, coleta das tensões e correntes e o procedimento de ajuste de curvas para obtenção das equações correspondentes ao caso “ótimo” e “mínimo”.

4.1 VISÃO GERAL

O estudo proposto é desenvolvido por meio de simulações computacionais no domínio do tempo, com a utilização do programa para estudos de transitórios eletromagnéticos ATPDraw, do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). As discussões presentes nesta dissertação são fundamentadas em dados de 10 linhas de transmissão de circuitos simples, que correspondem a trechos que compõem a Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN), operando em nível de tensão nominal de 500 kV.

Para cada conjunto de simulações, as linhas são dispostas individualmente entre duas barras pertencentes a um trecho da interligação Norte-Nordeste, especificamente entre as subestações de R. Gonçalves e S. J. do Piauí, cuja modelagem dos componentes encontra-se realizada no ATPDraw. Na Figura 4.1 é apresentado um trecho do diagrama unifilar do sistema modelado, explicitando o local onde serão inseridas as linhas, denominada LT_1 . Ademais, é possível observar a presença de conjuntos de reatores de linha (X_L) solidamente aterrados em ambos os terminais, que serão posteriormente modificados para incluir os reatores de neutro (X_n) e compor parte das avaliações.

Figura 4.1: Trecho da interligação Norte-Nordeste (500 kV).



Fonte: Autoria Própria.

Os sistemas adjacentes ao objeto de estudo são representados de forma simplificada por meio de fontes equivalentes de Thévenin e dados de sequência, além de compensações reativas e capacitivas pré-existentes dos trechos, presentes de forma detalhada no Anexo A deste trabalho.

4.2 DADOS UTILIZADOS

4.2.1 Linhas de transmissão

Ao todo, foram utilizadas 10 linhas de transmissão de 500 kV, cujos dados de sequência são apresentados na Tabela 4.1, bem como os respectivos valores da relação entre a capacitância de sequência positiva e zero (c_1/c_0).

Tabela 4.1: Dados de sequência das linhas de transmissão utilizadas nas simulações.

De	Para	R_1	X_1	B_1	R_0	X_0	B_0	c1/c0
		[Ω/km]	[Ω/km]	[$\mu\text{S}/\text{km}$]	[Ω/km]	[Ω/km]	[$\mu\text{S}/\text{km}$]	
Xingó	Angelim II	0,026	0,319	5,21	0,362	1,394	3,389	1,54
CE Mirim	C. Grande III	0,027	0,3261	5,0786	0,3943	1,368	3,1895	1,59
Angelim II	Pau Ferro	0,033	0,317	5,203	0,4	0,992	3,084	1,69
Garanhuns II	Pau Ferro	0,017	0,268	6,235	0,352	1,335	3,647	1,71
J. Câmara III	Açu III	0,017	0,2703	6,0462	0,1818	0,9427	3,4497	1,75
Suape III	Messias	0,025	0,315	5,212	0,208	1,041	2,92	1,78
C. Grande III	Garanhuns II	0,017	0,2703	6,1662	0,1818	0,9427	3,4379	1,79
Sta. Luzia	Milagres II	0,018	0,261	6,4465	0,406	1,275	3,506	1,84
Ribeirãozinho	Rio Verde Norte	0,017	0,264	6,271	0,373	1,375	3,382	1,85
Xingó	Messias	0,025	0,322	5,078	0,32	1,298	2,718	1,87

Fonte: Autoria Própria.

Na prática, estes valores de capacitâncias dependem de características da LT, como por exemplo a disposição geométrica dos cabos. Entretanto, os valores escolhidos para o trabalho correspondem a faixas típicas e foram selecionados de forma crescente, como parte da investigação para compreender o impacto e comportamento do sistema elétrico diante dessa alteração.

No ATPDraw, todas as linhas foram modeladas considerando o modelo perfeitamente transposto, com parâmetros distribuídos e constantes na frequência. Não foram considerados os efeitos da condutância no modelo escolhido e o comprimento da LT foi variado visando parametrizar esta variável.

4.2.2 Variações dos Parâmetros de Simulação

Para a realização das análises, foram adotadas as seguintes variações nos parâmetros:

- **Comprimento (L):** Cada linha foi simulada com cinco comprimentos distintos, variando de 200 km a 400 km de extensão, com incrementos de 50 km.
- **Níveis de compensação (F):** Foram adotados 23 valores distintos para a compensação em derivação da LT, abrangendo a faixa de 30% a 85%, com um passo de 2,5% entre cada valor. O total de reativos utilizado para determinado nível de compensação da LT foi distribuído igualmente em ambos os terminais (vide Figura 4.1). Não foram considerados os efeitos da saturação nos elementos indutivos, sendo os reatores representados por um componente trifásico, com indutância ideal e fator de qualidade definido igual a 400.
- **Reatores de neutro:** Foram analisadas 49 possibilidades de reatores de neutro para cada nível de compensação. Estes valores foram obtidos desenvolvendo a equação 4.1, resultando na equação 4.2, considerando o intervalo entre 1,1 e 6,0, com um incremento de 0,1.

$$r_h = \frac{X_0}{X_1} = \frac{X_L + 3X_n}{X_L}. \quad (4.1)$$

$$X_n = \frac{r_h X_L - X_L}{3}. \quad (4.2)$$

onde X_0 representa a reatância de sequência zero, X_1 representa a reatância de sequência positiva, X_L representa o reator de linha e X_n representa o reator de neutro.

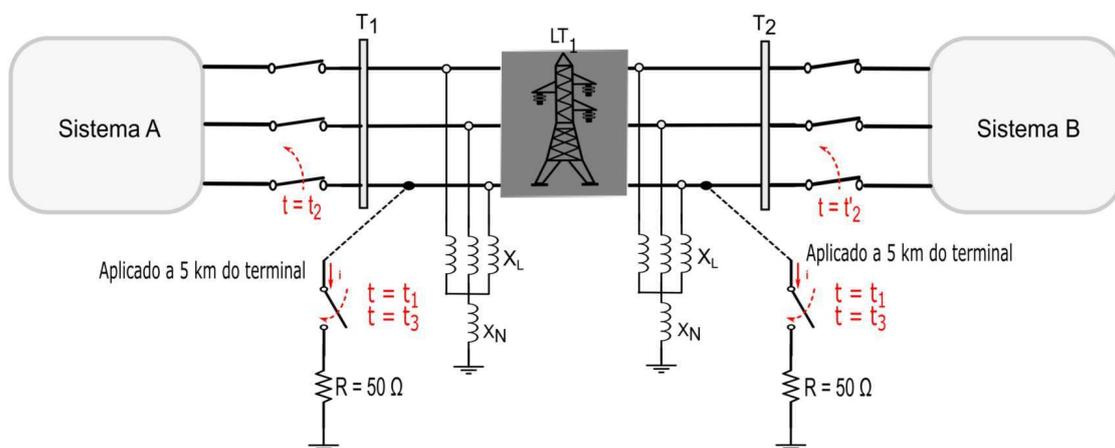
Esta abordagem, presente em diversos trabalhos da literatura e cujos detalhes são discutidos em Tavares e Portela (2004), baseia-se na relação entre as reatâncias de sequência zero (X_0) e positiva (X_1 ou X_L), sendo uma alternativa à abordagem analítica (vide subseção 2.3.3.2), pela simplicidade e visto que em conjunto com uma análise de sensibilidade, pode possibilitar a escolha do reator a partir de uma avaliação mais ampla de cenários do sistema.

- **Local de aplicação da falta:** Para cada simulação, um curto-circuito monofásico foi aplicado em dois pontos, especificamente a uma distância de 5 km de cada terminal ao longo do comprimento total da linha. O circuito adotado para simular a falta consistiu em uma chave ideal e um elemento resistivo com valor de 50Ω , conforme recomendação dos Procedimentos de Rede.

Devido ao esquema de transposição presente no modelo de linha adotado, não foram observadas diferenças significativas na intensidade da corrente de curto-circuito entre as fases. Logo, a fase A foi escolhida como referência para a ocorrência da falta nas análises.

Na Figura 4.2, é representado o sistema genérico (LT_1) adotado para realização das simulações, com o banco de reatores de fase (X_L) e neutro (X_N). Os sistemas A e B representam os demais componentes do sistema elétrico, conectados aos terminais da LT em estudo.

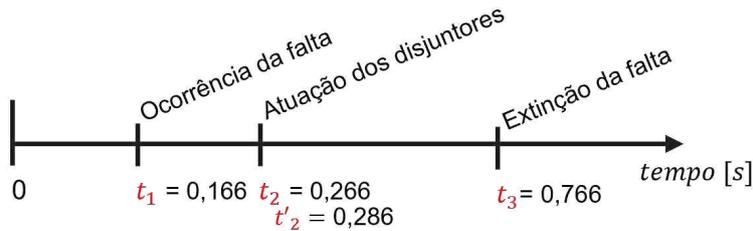
Figura 4.2: Representação LT_1 com reatores para análise de sensibilidade.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 4.3, mostra-se a linha temporal utilizada em todas as simulações. Importante salientar que um intervalo de 20 ms foi adotado entre os tempos de abertura (t_2 e t'_2) dos disjuntores (Transferência de Disparo - TDD) nas extremidades da linha, sendo este valor também apresentado nas documentações como um valor típico.

Figura 4.3: Marcações de tempo para a manobra monopolar.

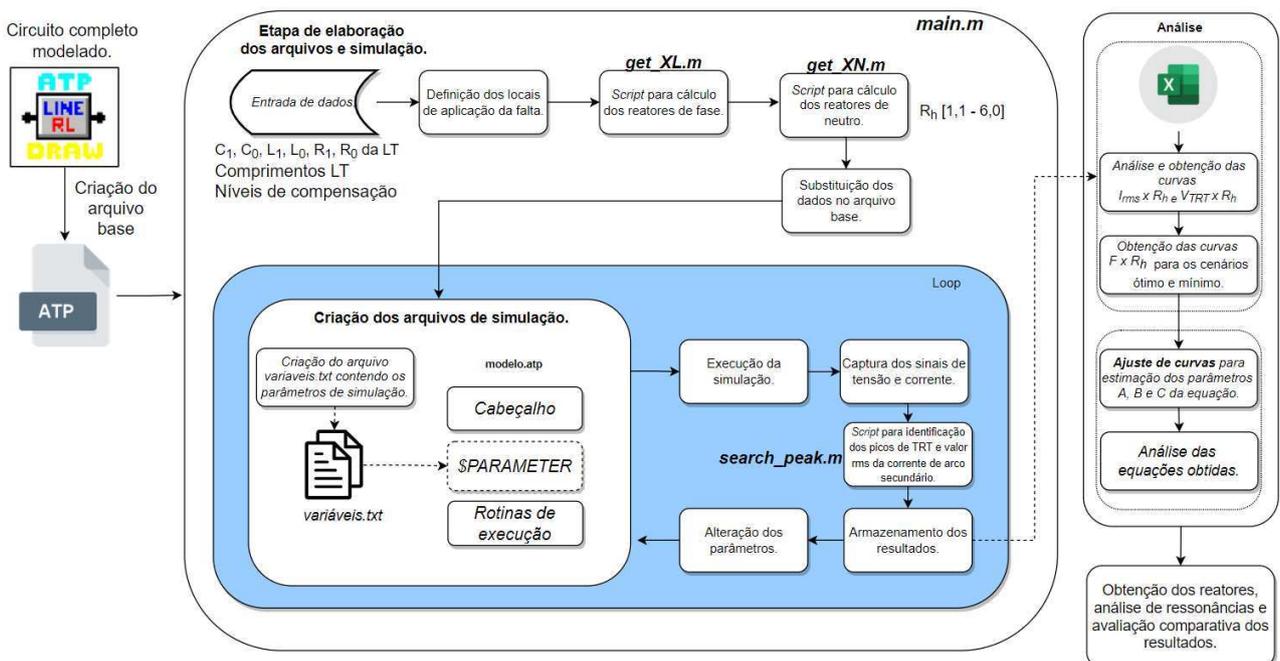


Fonte: Autoria Própria.

4.3 ETAPAS DO TRABALHO

Esta seção aborda os procedimentos utilizados para a execução das simulações e análise dos dados resultantes. Na Figura 4.4 é apresentado o fluxograma geral da pesquisa, cujos detalhes serão comentados nas subseções a seguir.

Figura 4.4: Procedimento Geral.



Fonte: Autoria Própria.

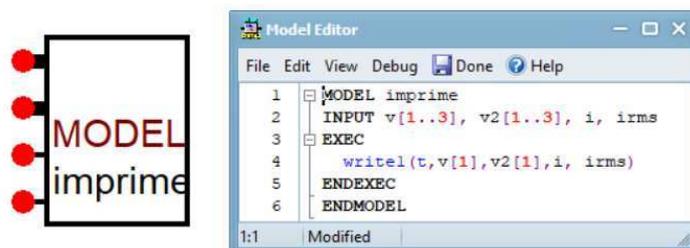
4.3.1 Simulações computacionais

Dada a quantidade de combinações de parâmetros a serem variados, optou-se por automatizar a execução de simulações no domínio do tempo e executá-las sem o uso da interface gráfica ATPDraw. Para isto, foi modelado um sistema completo no ATPDraw (vide representação presente no Apêndice A), cujo arquivo de configuração foi adotado como base para as demais simulações.

O arquivo de simulação *.atp* correspondente teve a estrutura alterada com a inclusão de uma seção adicional denominada \$PARAMETER, para possibilitar a manipulação de valores de parâmetros de interesse. Esta decisão foi tomada para tornar a realização das simulações mais flexível, visto que a interface gráfica do ATP, apesar de possuir um *parser* para inclusão de variáveis de simulação, apresenta limitações para realizar combinações de números elevados de cenários.

Adicionalmente, foi habilitado um arquivo de *log* para registrar as variáveis correspondentes de tempo, correntes e tensões de interesse para cada simulação, a partir do código em linguagem MODELS apresentado na Figura 4.5, sendo estes resultados necessários para etapas posteriores da análise.

Figura 4.5: Código para captura das grandezas de simulação em linguagem MODELS.



Fonte: Autoria Própria.

Para execução das simulações no domínio do tempo, uma rotina denominada *main* foi implementada em um programa de cálculo numérico, sendo esta composta por um conjunto de estruturas de repetição aninhadas. De forma geral, a *main* é responsável pela chamada das funções de cálculo auxiliares, definição dos parâmetros de sequência específicos de cada linha

adotada, composição e execução do arquivo .atp modificado via ATP e armazenamento dos resultados.

Essa rotina permite iterar sobre os vetores especificados na seção anterior, como comprimentos, níveis de compensação reativa, locais de aplicação de falta e valores de reatores de neutro, totalizando cerca de 112 mil combinações.

As principais funções auxiliares utilizadas durante as execuções são listadas a seguir, bem como o objetivo de cada uma delas.

- *get_XL.m*

- Função para realizar o cálculo dos reatores de linha (X_L) com base no comprimento (km), capacitância de sequência positiva (μ F/km), nível de compensação desejado e tensão nominal da LT.

- *get_XN.m*

- Função para obter os respectivos valores para os reatores de neutro (X_n), com base no reator de linha (X_L) previamente calculado e o vetor de r_h .

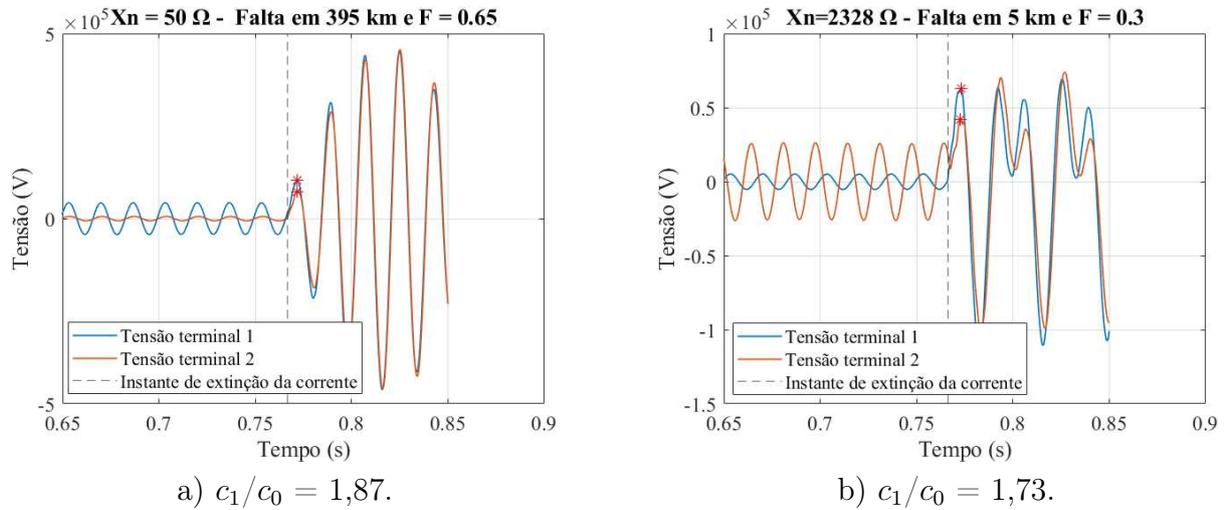
- *search_peak.m*

- Função para identificação do fim do curto-circuito e obtenção dos primeiros picos da tensão de restabelecimento transitória nos dois terminais.

Para fins de exemplificação, na Figura 4.6 (a) e Figura 4.6 (b) são apresentados os resultados desta função para LTs com relação $c_1/c_0 = 1,87$ e $1,73$, correspondentes a níveis de compensação de 65% e 30%, respectivamente.

A identificação correta destes picos é de extrema importância, dado que ao se avaliar a área correspondente à zona de provável extinção do arco secundário, leva-se em consideração o par composto por $[I_{rms}, V_p]$.

Figura 4.6: Exemplos de detecção do pico da TRT para cenários diferentes de simulação.



Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 4.2 são resumidos os parâmetros passíveis de modificação via *script* a partir da automatização realizada.

Tabela 4.2: Conjunto de parâmetros - arquivo_base.atp

Descrição do Parâmetro	Nome da Variável
Reatância de neutro (X_N)	REATAN = XN
Resistor do neutro (Ω)*	RESIST = RN
Reatância de fase (X_L)	REAFAS = XLL
Resistor do reator de fase (Ω)*	RESFAS = RLL
Comprimento total (km)	COMPTO = LTOTAL
Comprimento L (local da falta) (km)	COMPRL = LKM
Comprimento M (km)**	COMPRM = MKM
Reatância capacitiva seq. + ($\mu S/m$)	REATB1 = BC1
Reatância capacitiva seq. 0 ($\mu S/m$)	REATB0 = BC0
Reatância indutiva seq. + (Ω/m)	REATX1 = XL1
Reatância indutiva seq. 0 (Ω/m)	REATX0 = XL0
Resistência seq. + (Ω/m)	RESEQ1 = RSEQ1
Resistência Seq. 0 (Ω/m)	RESEQ0 = RSEQ0

* Valores calculados com fator de qualidade = 400. **Correspondente a $(L_{total} - L)$.

Fonte: Autoria Própria.

4.3.2 Simulações no domínio da frequência

As simulações em frequência são realizadas com o uso da ferramenta *Frequency Scan* disponível no *ATPDraw*. Essa funcionalidade permite realizar monitoramento das grandezas de interesse em uma faixa de frequência predeterminada, de modo a identificar se são induzidas sobretensões devido à presença de componentes conectados às fases, tais como os reatores, que possam ser danosas aos equipamentos presentes.

Para obtenção da impedância $Z(j\omega)$ equivalente vista dos terminais do sistema, são aterradas as fontes de tensão existentes nos demais trechos conectados aos dois barramentos, sendo inserida uma fonte senoidal monofásica de corrente com amplitude de 1 A no terminal onde ocorre a medição. Para o uso do *Frequency Scan*, foram elencados os seguintes cenários:

- Sistema com uma das fases aberta: correspondente ao cenário pós-extinção de uma falta monofásica, com monitoramento de tensão nos terminal onde a fonte de corrente foi aplicada.
- Corrente eficaz de arco secundário: correspondente ao cenário com o curto aplicado, fase aberta após atuação da proteção e monitoramento da corrente no elemento resistivo.

4.3.3 Obtenção e análise das curvas indicativas

Os dados foram armazenados em 1150 tabelas no formato .csv, a partir das quais foram construídas curvas discretas contendo os valores da corrente eficaz de arco secundário e do primeiro pico da tensão de restabelecimento transitória em relação aos reatores adotados, para ambos os terminais.

Na Tabela 4.3 é exemplificado um trecho dos resultados organizados durante esta etapa, com uma supressão dos valores intermediários de r_h para fins de simplificação. A tabela refere-se a linha de transmissão de 400 km de comprimento, 85% de compensação reativa e relação entre capacitâncias $c_1/c_0 = 1,87$.

Tabela 4.3: Exemplo de dados obtidos por meio das simulações (compensação 85%).

Para F = 0,85									
r_h	Reator $X_n(\Omega)$	Localização da falta						Cenários mais adversos	
		T_1			T_2			$I_{m\acute{a}x} (A_{rms})$	TRT $_{m\acute{a}x}(kV)$
		$I_{arc} (A_{rms})$	TRT $_{T_1} (kV)$	TRT $_{T_2} (kV)$	$I_{arc} (A_{rms})$	TRT $_{T_1} (kV)$	TRT $_{T_2} (kV)$		
1,1	38,61	81,94	62,92	34,98	80,57	91,70	60,78	81,94	91,70
1,2	77,23	69,15	53,78	25,45	67,90	82,76	51,57	69,15	82,76
1,3	115,84	58,25	45,83	17,11	57,05	74,89	43,53	58,25	74,89
.
.
.
5,8	1853,41	49,44	42,62	74,29	51,75	14,54	44,29	51,75	74,29
5,9	1892,03	49,99	43,13	74,84	52,32	15,06	44,80	52,32	74,84
6	1930,64	50,52	43,61	75,36	52,88	15,56	45,28	52,88	75,36

Fonte: Autoria Própria.

A coluna denominada “Cenários mais adversos” é composta pelo par $(I_{m\acute{a}x}, TRT_{m\acute{a}x})$, com os valores mais elevados encontrados durante a execução das simulações para a corrente eficaz e pico da tensão de restabelecimento.

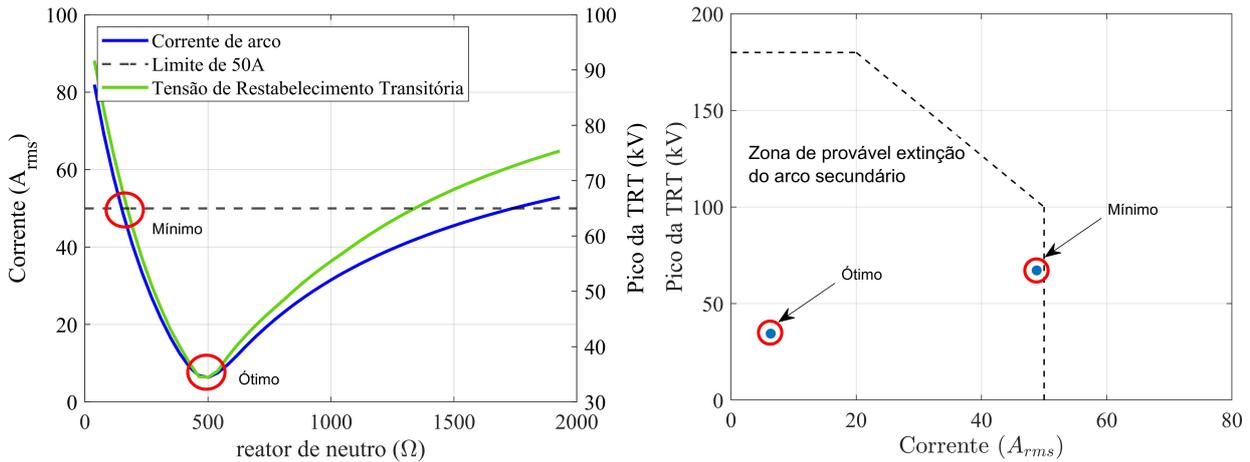
Estas tabelas foram utilizadas para observar a tendência das curvas e identificar quais conjuntos de reatores possibilitam a redução da corrente de arco secundário de acordo com o nível de compensação adotado para as diferentes linhas de transmissão, além da influência do comprimento no nível do curto-circuito.

De posse das tabelas, o próximo passo adotado foi a identificação de dois cenários específicos, que serão recorrentemente referenciados durante a discussão dos resultados posteriores, sendo eles:

- Cenário com reator “ótimo”: correspondente ao ponto no qual a amplitude da corrente de arco secundário e o pico da TRT possuem os valores mínimos, indicando a maior probabilidade de extinção do arco elétrico, nos cenários avaliados.
- Cenário com reator “mínimo”: correspondente ao menor valor de reator que propicia o atendimento ao critério de corrente observado nos Procedimentos de Rede (50 A) e de tensão (100 kV). É importante notar que, apesar do limite máximo de tensão presente na curva indicativa ser 180 kV, este limite diminui ao passo que a corrente excede 20 A de amplitude.

Na Figura 4.7 (a) é apresentado o gráfico correspondente às curvas obtidas com a Tabela 4.3, destacando-se os pontos considerados como ótimo e mínimo comentados anteriormente, ao passo que na Figura 4.7 (b), é ilustrado onde tais pontos estariam localizados segundo o critério 1 dos Procedimentos de Rede.

Figura 4.7: I_{arco} e TRT (compensação 85%).



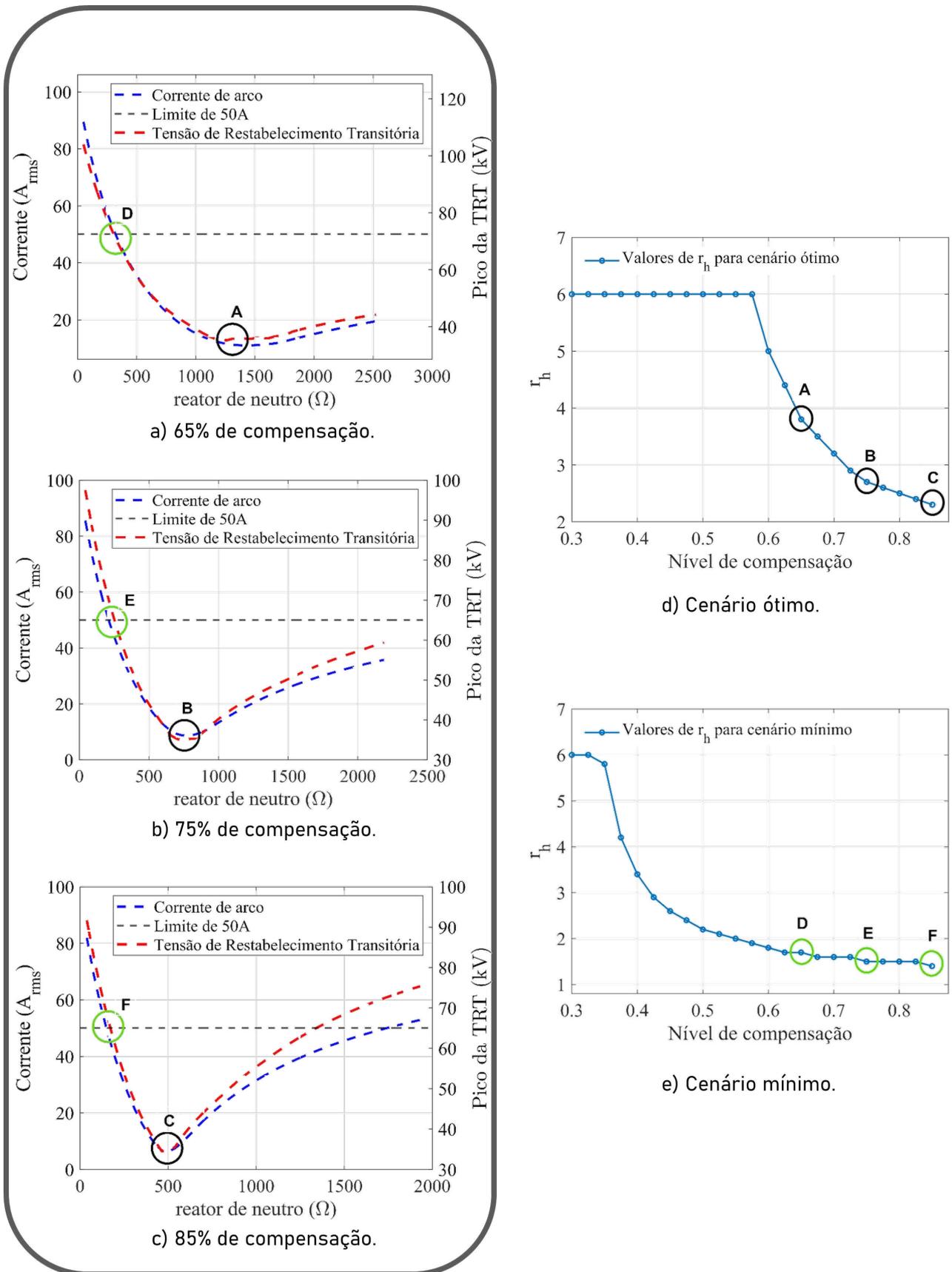
a) Cenários mais adversos para cada reator. b) Curva indicativa para análise de extinção de corrente de arco secundário.

Fonte: Autoria Própria.

Após a análise dos gráficos que relacionam correntes eficazes e picos da TRT com os reatores de neutro, foi mapeado outro conjunto de curvas para os cenários ótimo e mínimo, respectivamente. Essas curvas relacionam o valor de r_h , obtido através da equação 4.1, com o nível de compensação reativa em derivação da linha (F). Para fins de exemplo, na Figura 4.8 é apresentado o procedimento para os níveis de compensação de 65%, 75% e 85%, destacados pelos círculos em 4.8 (a), 4.8 (b) e 4.8 (c), respectivamente. Os pontos A, B e C representam os valores dos reatores ótimos, ao passo que os pontos D, E e F representam os valores dos reatores mínimos.

À direita, os gráficos 4.8 (d) e 4.8 (e) representam as curvas resultantes para os dois cenários, nos quais os pontos mencionados na Figura 4.8 (a), 4.8 (b) e 4.8 (c) são mapeados. Este procedimento foi adotado com os 23 níveis de compensação para as 10 linhas avaliadas.

Figura 4.8: Diagrama do procedimento de obtenção das curvas - r_h vs compensação reativa para a LT com $c_1/c_0 = 1,87$ e 400km.



Fonte: Autoria Própria

4.3.4 Obtenção das equações

A etapa subsequente consistiu em obter equações para representar os resultados das curvas que relacionam o fator r_h com o nível de compensação reativa para as linhas de transmissão nos dois cenários específicos. Para isso, foi utilizado um *script* de ajuste de curvas, no qual optou-se pelo modelo matemático da série de potência de dois termos, cujo formato é apresentado na equação 4.3, onde Y representa a variável dependente correspondente ao valor de r_h , ao passo que X representa o valor da compensação reativa (F).

$$Y = aX^b + c. \quad (4.3)$$

Esta escolha se deu devido ao fato de que outros modelos investigados na pesquisa, como o exponencial de dois termos e o polinomial de 4^a e 5^a ordem, apesar de conseguirem aproximar o valor das amostras por meio de uma equação, resultavam em coeficientes bastante elevados, além da formulação matemática ser mais complexa.

Desta forma, para cada linha de transmissão, o valor de r_h foi representado por uma aproximação com a equação 4.4. Os coeficientes a , b e c presentes na equação são discutidos na seção de resultados.

$$r_h = aF^b + c. \quad (4.4)$$

Nesta etapa do trabalho, o foco é a avaliação da influência do comprimento (L), nível de compensação e da relação c_1/c_0 no comportamento das equações e das curvas. O objetivo é identificar, na mesma linha de transmissão ou entre linhas diferentes, possíveis padrões ou similaridades que possam embasar uma formulação matemática aplicável à determinação dos valores adequados de reatores de neutro para outras LTs com características semelhantes e estabelecer uma análise sobre como cada parâmetro influencia na determinação do r_h .

De posse das equações, serão realizadas análises comparativas com as abordagens presentes na literatura, para aferir se os resultados de fato correspondem a aproximações válidas dos valores dos reatores. Ademais, serão discutidas possíveis limitações identificadas durante o processo.

4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos adotados para alcançar os resultados do trabalho. Inicialmente, realizou-se uma visão abrangente dos dados referentes às linhas de transmissão empregadas. Em seguida, foram detalhados os parâmetros de simulação e as variações adotadas. As simulações foram conduzidas tanto no domínio do tempo quanto em frequência (*Frequency Scan*), por meio do uso do programa ATPDraw, utilizando *scripts* de automação para esse fim.

Em seguida, aborda-se a coleta de dados provenientes das simulações, que consistem em conjuntos de curvas discretas. O procedimento para a obtenção de cada cenário de interesse foi apresentado. Adicionalmente, novos conjuntos de curvas foram gerados, estabelecendo relações entre os valores das razões r_h , comprimentos e compensação reativa das 10 linhas de transmissão sob estudo.

Por fim, o modelo matemático escolhido para o ajuste de curvas foi apresentado, sendo este uma série de potência de dois termos. A aplicação de uma ajuste de curvas visa encontrar as equações que melhor descrevem os dados coletados e tem como objetivo identificar possíveis padrões nos resultados.

No capítulo seguinte serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da metodologia proposta.

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio dos passos indicados na metodologia do trabalho. Inicialmente, as formas de onda são discutidas, com base nas tendências e características gerais notadas em relação à variação de comprimento e níveis de compensação das linhas de transmissão. Em seguida, dá-se foco especificamente ao cenário ótimo e mínimo, com os respectivos mapeamentos de pontos para composição das curvas $F \times r_h$, cujos valores são utilizados para o procedimento de ajuste de curvas e obtenção das equações, para diferentes razões c_1/c_0 e comprimentos. Por fim, a formulação obtida para o cenário ideal é confrontada com uma fórmula da literatura, para fins comparativos.

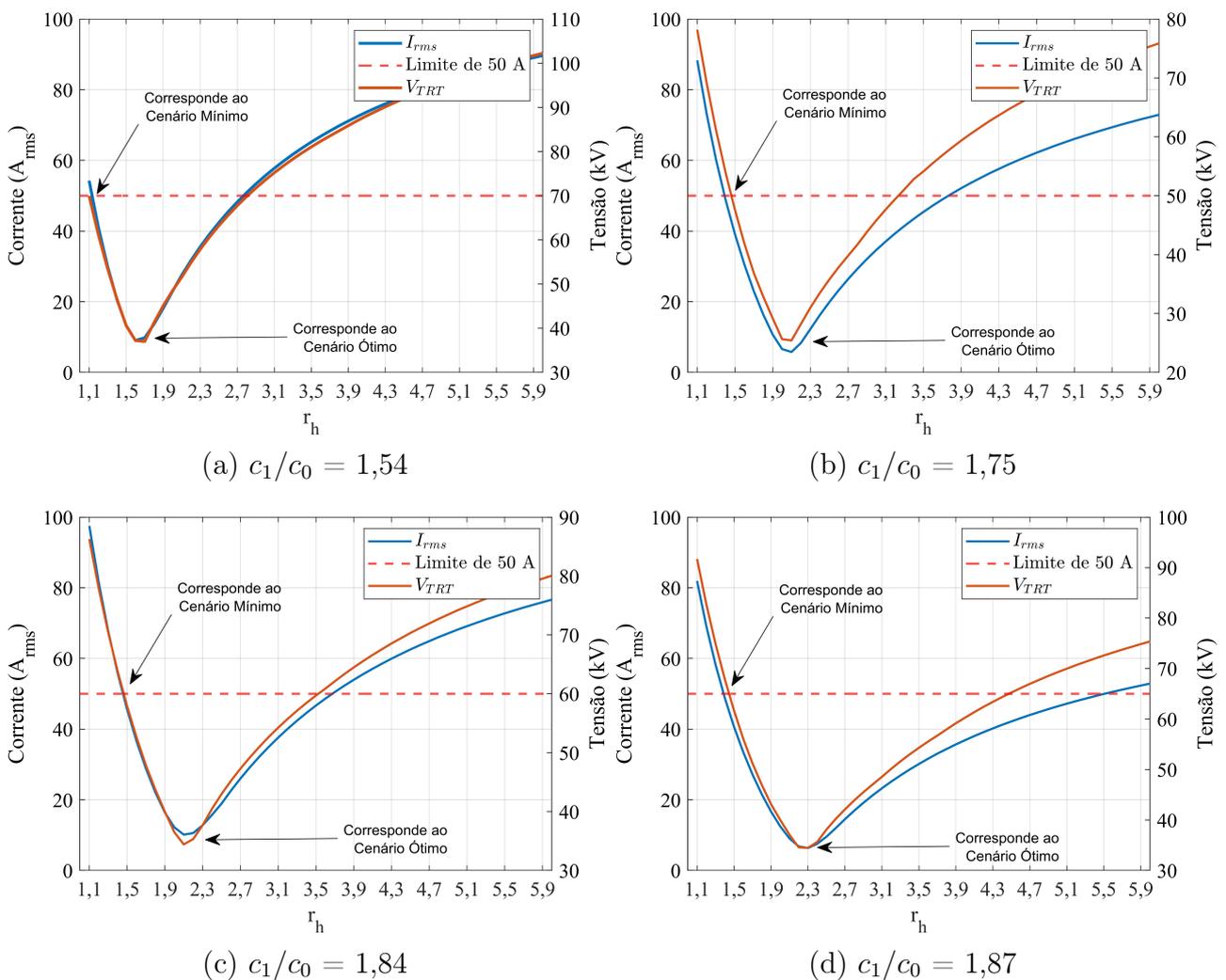
5.1 ASPECTOS GERAIS

Ao analisar as curvas de r_h em relação à corrente eficaz I_{rms} e ao pico de tensão de restabelecimento transitória V_{TRT} , foram identificadas algumas características comuns em todos os conjuntos de dados. Verificou-se a existência de intervalos de r_h em que os reatores correspondentes permitem o atendimento às normas durante a ocorrência de faltas monofásicas. Ao se considerar o caso com limite máximo de corrente, estes valores correspondem à $I_{rms} = 50$ A e $V_{TRT} = 100$ kV.

Na Figura 5.1, são apresentados os resultados para quatro LTs distintas com comprimento fixado em 400 km e nível de compensação igual a 85%. Para cada cenário, é possível identificar nas curvas um conjunto de valores de r_h cuja adoção implica na minimização das amplitudes de I_{rms} e V_{TRT} . Estes intervalos, que dependem do comprimento, relação c_1/c_0 e nível de compensação, indicam pontos nos quais o acoplamento mútuo capacitivo de cada LT é reduzido de forma mais eficaz pelo respectivo reator de neutro, resultando em menores correntes de arco secundário.

Evidentemente, a partir do ponto mínimo dos gráficos referentes ao cenário ótimo, a faixa à direita destes correspondem a valores de r_h que implicam em maiores reatâncias. No entanto, esse aumento não se reflete em uma diminuição significativa da corrente resultante. Portanto, neste trabalho, será dado foco ao intervalo compreendido entre o cenário mínimo e ótimo, enquanto os demais valores à direita serão desprezados pois, a priori, não apresentam vantagens práticas que justifiquem sua adoção.

Figura 5.1: Curvas I_{rms} e V_{TRT} para 400 km de comprimento.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 5.1 (a), é verificado que a simulação com um reator de neutro cujo valor corresponde a um fator r_h de 1,6 resultou em uma diminuição da corrente para aproximadamente 10 A e do primeiro pico de tensão para cerca de 37 kV. Um padrão semelhante pode ser observado

para todas as demais curvas, como na Figura 5.1 (b) cuja adoção de r_h igual a 2,1 resulta nos valores de 5,7 A e 25 kV, respectivamente.

Ambos os casos mencionados encontram-se consideravelmente abaixo dos limites máximos previstos nos procedimentos de rede e constituem cenários considerados próximos ao ideal no contexto do sistema simulado, pois resultam em menores esforços para os equipamentos envolvidos, em termos de corrente eficaz e primeiro pico de tensão pós extinção.

No entanto, apesar destes corresponderem aos melhores reatores para a simulação, com os quais a neutralização dos efeitos da capacitância mútua foi mais eficaz, não necessariamente estes compõem as opções com a melhor relação custo-benefício, dado que o valor de r_h no qual ocorre esta minimização pode ser grande o suficiente para tornar um reator X_n inviável economicamente, a depender do caso.

Sabendo disto, ao observar a corrente eficaz, é natural que se note a possibilidade da utilização de um equipamento com menor reatância, ao reduzir o valor de r_h até o limiar da corrente, mantendo a conformidade com o critério de 50 A. Nas Figuras 5.1 (c) e (d), cujas relações entre as capacitâncias correspondem a $c_1/c_0 = 1,84$ e $c_1/c_0 = 1,87$, os menores valores de r_h considerando este contexto são 1,5 e 1,4, respectivamente. Estes valores, se comparados com os respectivos cenários ideais para cada LT, representam uma diminuição de 2,2 e 3,25 vezes a reatância X_n .

Estas duas possibilidades de cenários possuem implicações distintas e serão discutidas com mais detalhes em seções posteriores.

5.1.1 Variação de comprimento (km)

Para analisar o impacto da alteração do comprimento em relação à corrente de arco secundário, foram realizadas simulações utilizando valores de compensação reativa e c_1/c_0 fixados, ao passo que o comprimento foi variado entre 200 km e 400 km.

De forma geral, para um mesmo valor de r_h , o aumento do comprimento teve como principal característica uma corrente de arco secundária mais elevada, sendo este padrão observado para todas as 10 linhas estudadas. Tal comportamento é coerente com a teoria apresentada na fundamentação teórica, que indica que a capacitância mútua total ($C_{\Delta T_{total}}$) é proporcional ao

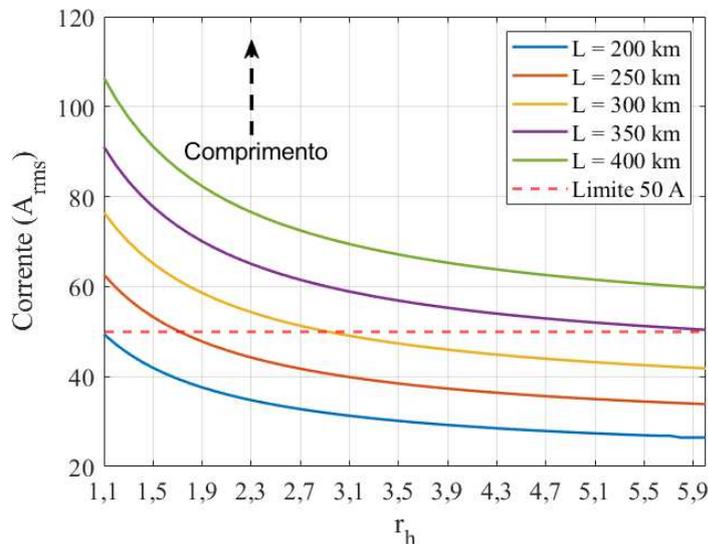
comprimento da linha e, conseqüentemente, também proporcional à corrente de curto-circuito após a abertura dos disjuntores.

$$C_{\Delta T_{total}} = \frac{(c_1 - c_0)L}{3}.$$

Onde $C_{\Delta T_{total}}$ representa a capacitância mútua, c_1 e c_0 representam as capacitâncias de sequência positiva e zero e L representa o comprimento em km.

Na Figura 5.2 é apresentado um dos resultados de correntes eficazes obtidas para a LT com $c_1/c_0 = 1,87$ e 30% de compensação, além da representação do limite de 50 A e da tendência de deslocamento das curvas de acordo com o comprimento.

Figura 5.2: Corrente eficaz I_{rms} para diferentes comprimentos — LT com $c_1/c_0 = 1,87$.



Fonte: Autoria Própria.

Para o resultado da Figura 5.2, percebe-se que a adoção de um comprimento superior a 350 km ocasionaria um cenário no qual não seria possível cumprir o critério de extinção para a corrente, independentemente do reator adotado. Este comportamento se dá pelo fato de que o comprimento da LT é inversamente proporcional ao reator de linha (X_L), ocasionando uma diminuição no valor do reator de neutro (X_n), vide equação 4.2, que por sua vez acaba compensando uma parcela menor do acoplamento capacitivo e resulta em uma corrente mais elevada.

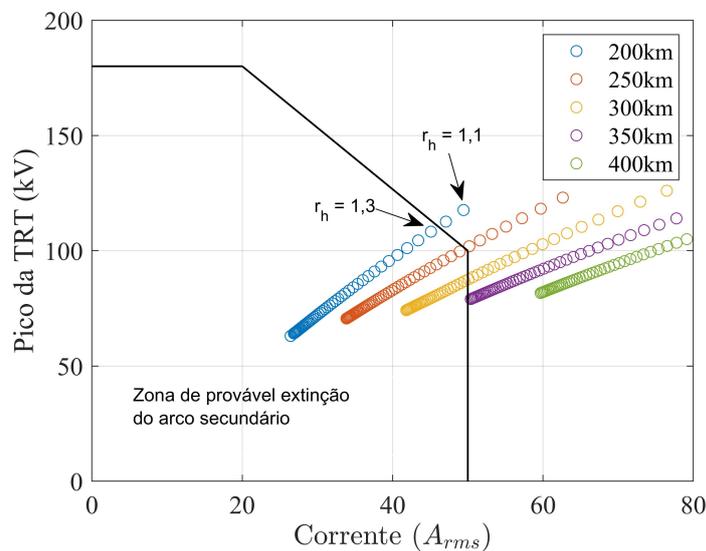
Nas simulações com 250 km e 300 km também foram identificadas algumas restrições, onde é possível notar que os menores valores de r_h viáveis surgem a partir de $r_h = 1,8$ e $r_h = 2,9$,

respectivamente.

Para 200 km, a curva indica que a adoção de um reator cujo r_h seja igual a 1,1 seria suficiente para garantir o atendimento ao limite de corrente. No entanto, esta última avaliação pode levar a conclusões incorretas, dado que a corrente deve ser observada em conjunto com o valor do pico da TRT, no qual foi observada uma inconformidade em relação ao critério de tensão, que estabelece um limite máximo de 100 kV para 50 A.

Na Figura 5.3 são apresentados os conjuntos de pares (I_{arco}, V_{TRT}) para todos os comprimentos citados nesta LT.

Figura 5.3: Curva indicativa - I_{arco} e V_{TRT} (compensação 30%).

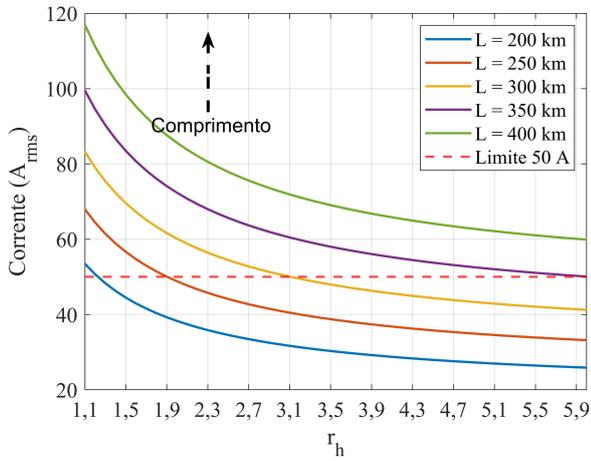


Fonte: Autoria Própria.

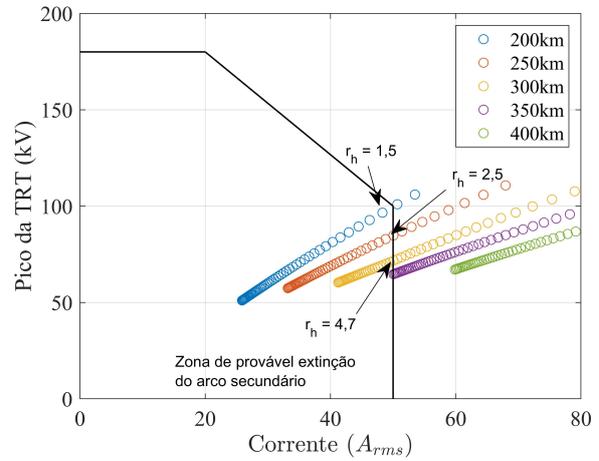
Verifica-se que o valor mínimo correto de r_h para atender ao critério com 200 km seria igual a 1,3, correspondente a um pico de TRT de aproximadamente 108 kV. Além disso, para comprimentos acima de 300 km, de fato não foram identificados pontos que cumpram os requisitos mínimos da curva indicativa. Para circunstâncias como estas, as curvas permitem definir uma limitação de comprimento máximo para a LT em questão, caso o nível de compensação adotado para o controle de tensão seja mantido.

Na Figura 5.4 o efeito da variação do comprimento em relação à corrente de arco secundário é apresentado para dois casos adicionais, cujo procedimento para avaliação pode ser estendido do exemplo anterior.

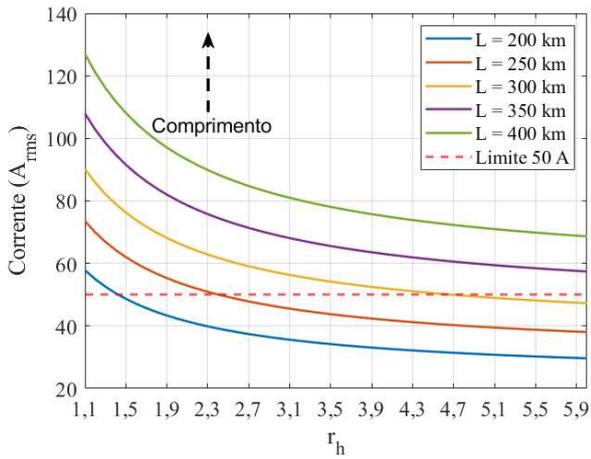
Figura 5.4: I_{rms} e V_{TRT} para diferentes comprimentos.



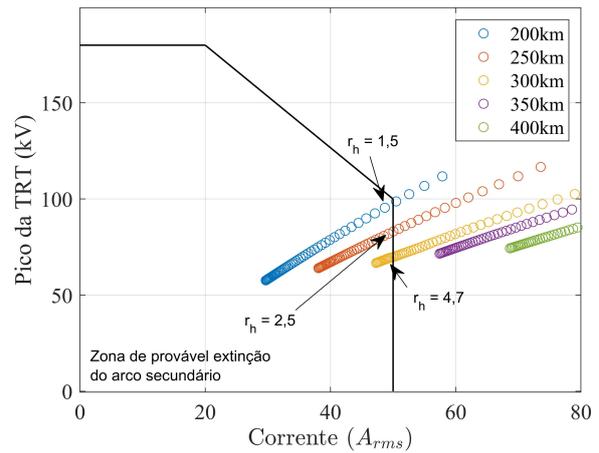
(a) $r_h \times I_{rms} - c_1/c_0 = 1,75$.



(b) $I_{rms} \times V_{TRT} - c_1/c_0 = 1,75$.



(c) $r_h \times I_{rms} - c_1/c_0 = 1,79$.



(d) $I_{rms} \times V_{TRT} - c_1/c_0 = 1,79$.

Fonte: Autoria Própria.

Ao se comparar cenários equivalentes nas duas representações, como por exemplo para o comprimento de 200 km, percebe-se que na Figura 5.4 (a), apesar do valor de r_h igual a 1,4 possibilitar o cumprimento do critério de corrente, o pico da TRT presente na Figura 5.4 (b) indica a necessidade de aumentar o respectivo reator de neutro para manter o valor de tensão abaixo dos limites. No segundo caso, da Figura 5.4 (c), o valor da razão r_h indica que poderia ser mantido em 1,5, dado que o pico da TRT se manteve dentro das especificações adequadas.

Entretanto, probabilisticamente tem-se uma maior chance de sucesso no religamento monopolar para valores que se afastem das bordas da curva indicativa. Logo, evidentemente, valores

de r_h mínimos cujos reatores correspondentes levam a resultados de tensão e corrente que se aproximam consideravelmente das bordas da curva indicativa do critério 1, não devem ser adotados sem que existam avaliações complementares que de fato garantam que a probabilidade do arco se extinguir no tempo morto requerido é plausível.

A Tabela 5.1 sumariza os intervalos de r_h encontrados para as 10 LTs em relação à extensão considerada, nos quais foram notados o atendimento aos limites de corrente. Em alguns casos, em que o intervalo possui um limite superior e inferior, como ilustrado anteriormente na Figura 5.1, os valores estão explicitamente apresentados na tabela, caso contrário, considera-se o limite superior igual a $r_h = 6$ e estes estão omitidos da tabela.

Observando o panorama geral da Tabela 5.1, o aumento do comprimento ocasionou um estreitamento do intervalo de r_h a partir de determinados níveis de compensação. Essa relação indica a existência de uma quantidade menor de valores possíveis a serem utilizados e é particularmente evidente para as LTs com os menores valores de c_1/c_0 , nas quais foram adotados maiores comprimentos e níveis de compensação.

Para ilustrar, pode-se considerar o caso da linha de transmissão com uma relação c_1/c_0 de 1,54, na qual a análise resultou em uma faixa de valores para r_h com o mínimo igual a 1,2 e o máximo igual a 2,7. O valor ótimo de r_h para esse cenário específico foi calculado como 2,0. Já para a linha de transmissão com c_1/c_0 de 1,87, os valores de r_h se estenderam de 1,4 (mínimo) a 5,5 (máximo), e o valor ótimo de r_h foi determinado como 2,3. Estes exemplos encontram-se ilustrados nas Figuras 5.1 (a) e (d), apresentadas anteriormente.

Tabela 5.1: Intervalos de r_h obtidos para todas as linhas de transmissão sob estudo.

c_1/c_0	1,54					1,59					1,69					1,71					1,75				
F	Comprimento (km)																								
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
0,3	1,1	1,1	1,4	1,8	2,3	1,1	1,1	1,5	2	2,9	1,1	1,3	1,9	2,8	4,7	1,3	2,0	3,4	-	-	1,3	2,0	3,2	-	-
0,35	1,1	1,1	1,3	1,6	1,9	1,1	1,1	1,4	1,7	2,2	1,1	1,3	1,7	2,2	2,9	1,2	1,7	2,4	3,5	5,8	1,2	1,7	2,4	3,4	5,2
0,4	1,1	1,1	1,2	1,4	1,7	1,1	1,1	1,3	1,6	1,8	1,1	1,2	1,5	1,9	2,3	1,2	1,6	2,0	2,6	3,4	1,2	1,6	2,0	2,6	3,3
0,45	1,1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,1	1,1	1,3	1,5	1,6	1,1	1,2	1,4	1,7	2	1,2	1,5	1,8	2,1	2,6	1,2	1,5	1,8	2,2	2,6
0,5	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2
0,55	1,1	1,1	1,1	1,3	1,4	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0
0,6	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8
0,65	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3 - 5,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7
0,7	1,1	1,1	1,1	1,2 - 5,4	1,2 - 4,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3 - 5,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6 - 5,5	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6
0,75	1,1	1,1	1,1	1,2 - 4,2	1,2 - 3,4	1,1	1,1	1,1	1,2 - 5,4	1,3 - 4,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4 - 5,4	1,1	1,2	1,3	1,4 - 5,4	1,5 - 4,3	1,1	1,2	1,4	1,4	1,5 - 5,6
0,8	1,1	1,1	1,1 - 4,7	1,1 - 3,6	1,2 - 3,0	1,1	1,1	1,1	1,2 - 4,3	1,2 - 3,5	1,1	1,1	1,2	1,3 - 5,4	1,3 - 4,3	1,1	1,2	1,3 - 5,6	1,4 - 4,3	1,4 - 3,6	1,1	1,2	1,3	1,4 - 5,3	1,5 - 4,4
0,85	1,1	1,1 - 5,7	1,1 - 3,9	1,1 - 3,1	1,2 - 2,7	1,1	1,1	1,1 - 4,7	1,2 - 3,7	1,2 - 3,1	1,1	1,1	1,2 - 5,7	1,3 - 4,3	1,3 - 3,9	1,1	1,2	1,3 - 4,5	1,3 - 3,6	1,4 - 3,2	1,1	1,2	1,3 - 5,4	1,4 - 4,3	1,4 - 3,7
c_1/c_0	1,78					1,79					1,84					1,85					1,87				
F	Comprimento (km)																								
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
0,3	1,1	1,5	2,3	3,8	-	1,5	2,5	4,7	-	-	1,6	2,9	-	-	-	1,7	3,0	-	-	-	1,1	1,8	2,9	-	-
0,35	1,1	1,4	1,9	2,6	3,8	1,4	2	3	4,9	-	1,5	2,2	3,5	-	-	1,5	2,3	3,7	-	-	1,2	1,6	2,3	3,4	5,8
0,4	1,1	1,3	1,7	2,2	2,7	1,3	1,8	2,4	3,2	4,4	1,4	1,9	2,6	3,6	5,4	1,4	1,9	2,7	3,8 - 6,0	-	1,1	1,5	1,9	2,5	3,4
0,45	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2	1,3	1,6	2	2,5	3,1	1,3	1,7	2,2	2,7	3,4	1,4	1,7	2,2	2,8	3,6	1,1	1,4	1,7	2,1	2,6
0,5	1,1	1,3	1,5	1,7	2	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	1,3	1,6	1,9	2,3	2,8	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2
0,55	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	1,3	1,5	1,7	2	2,2	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0
0,6	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,2	1,4	1,6	1,8	2	1,2	1,4	1,6	1,8	2	1,2	1,5	1,7	1,9	2,0	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8
0,65	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7
0,7	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6
0,75	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6 - 5,3	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7 - 5,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,8	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4 - 5,7	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6 - 5,0	1,2	1,3	1,4	1,5 - 5,1	1,6 - 4,3	1,2	1,3	1,4	1,5 - 5,7	1,6 - 4,6	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,85	1,1	1,1	1,2	1,3 - 5,7	1,4 - 4,6	1,1	1,3	1,4	1,4 - 4,8	1,5 - 4,1	1,2	1,3	1,4 - 5,2	1,4 - 4,2	1,6 - 3,6	1,2	1,3	1,4 - 5,9	1,5 - 4,6	1,5 - 3,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4 - 5,5

Fonte: Autoria Própria.

A partir de c_1/c_0 igual a 1,71, considerando os níveis de compensação inferiores a 40% e comprimentos acima de 350 km, foram verificados cenários de não atendimento com correntes excedendo 50 A, representados por traços.

Nestes casos específicos, onde nenhum dos reatores utilizados conseguiu manter a corrente abaixo do esperado, a adoção de outras formas de mitigação poderiam ser avaliadas na simulação. Uma alternativa seria considerar a aplicação do critério 2 dos procedimentos de rede, que amplia o limite máximo de corrente para 80 A, resultando em um aumento correspondente do tempo de extinção, com um limite máximo de 2,0 s.

De acordo com os resultados, alterações no comprimento da LT possuem alto impacto em relação à amplitude das correntes observadas durante curto-circuitos e podem se tornar fator limitante para que a aplicação do religamento monopolar seja justificada. Este problema pode ser observado especialmente ao se considerar níveis de compensação mais baixos, nos quais as variações na amplitude foram mais elevadas com o aumento do comprimento total.

Além disso, uma maior extensão da LT também faz com que o efeito Ferranti apareça de forma mais acentuada, podendo ser necessária a alteração do nível de compensação para que o controle de tensão seja feito de forma adequada. Algumas considerações sobre o efeito da variação do nível de compensação reativa em derivação são mostradas na seção a seguir.

5.1.2 Variação do nível de compensação (F)

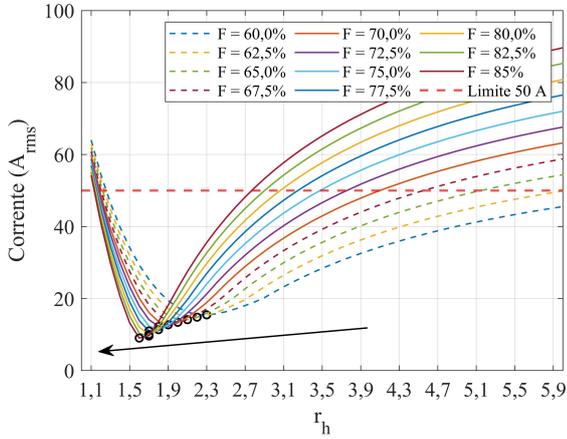
As análises realizadas nesta etapa são baseadas em simulações com comprimento fixo. Para fins de exemplificação, será adotado o caso de 400 km como referência nas figuras. No entanto, os pontos observados e discutidos se aplicam a todos os demais comprimentos utilizados.

Os comportamentos obtidos são apresentados na Figura 5.5, onde são dispostos os resultados para as 10 LTs, com níveis de compensação na faixa entre 60% e 85%. Em cada imagem, foi adicionada a referência de 50 A de corrente eficaz, bem como uma marcação para o ponto mínimo das curvas, de forma a facilitar a visualização do efeito do acréscimo da compensação.

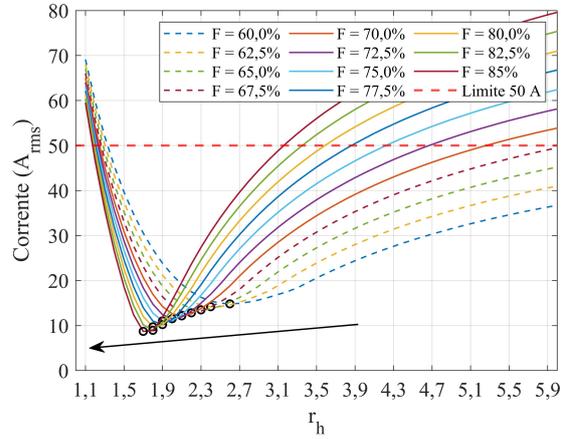
De modo geral, o aumento do nível de compensação para uma mesma linha teve como principal consequência o deslocamento do valor ótimo de r_h , cujo comportamento é representado por uma seta em cada um dos gráficos. Isto implica dizer que a reatância X_n necessária para

garantir a limitação da corrente durante o curto circuito apresentará um valor reduzido.

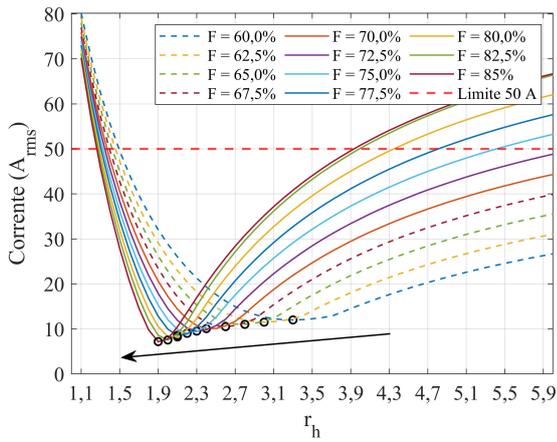
Figura 5.5: Correntes de arco secundário (I_{arco}) para diferentes LTs e níveis de compensação (F) - 400km.



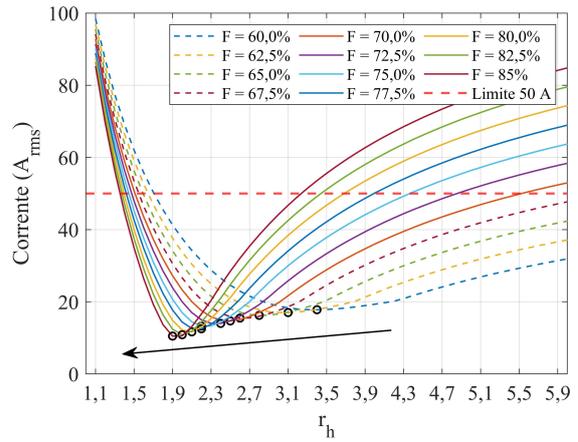
(a) $c_1/c_0 = 1,54$.



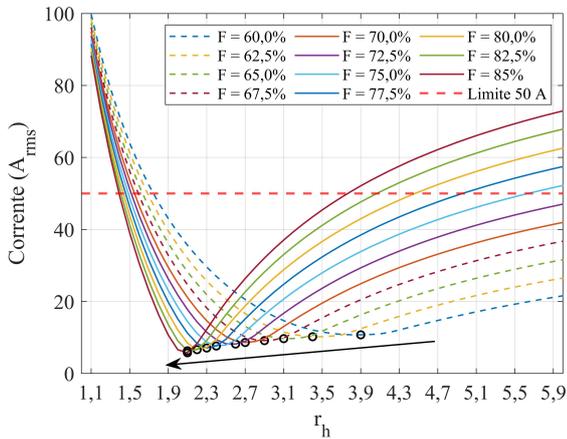
(b) $c_1/c_0 = 1,59$.



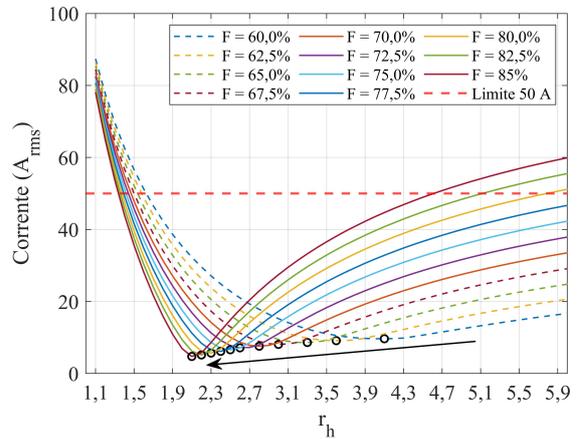
(c) $c_1/c_0 = 1,69$.



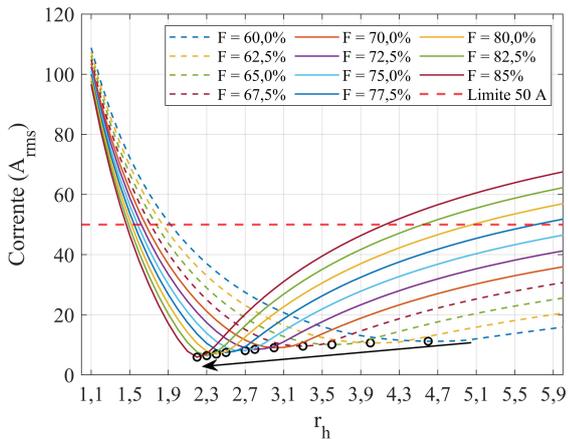
(d) $c_1/c_0 = 1,71$.



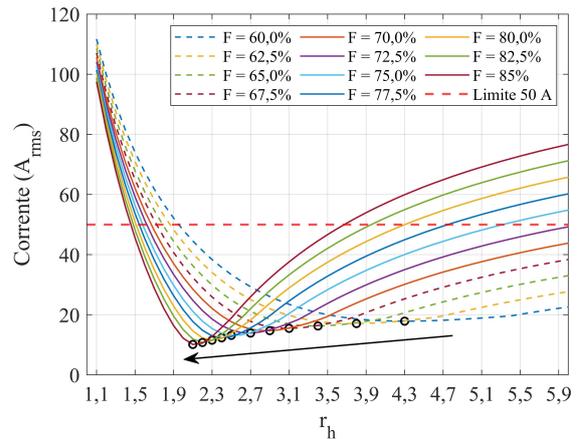
(e) $c_1/c_0 = 1,75$.



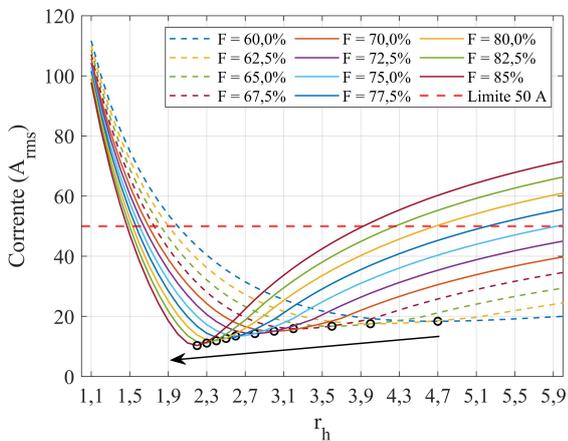
(f) $c_1/c_0 = 1,78$.



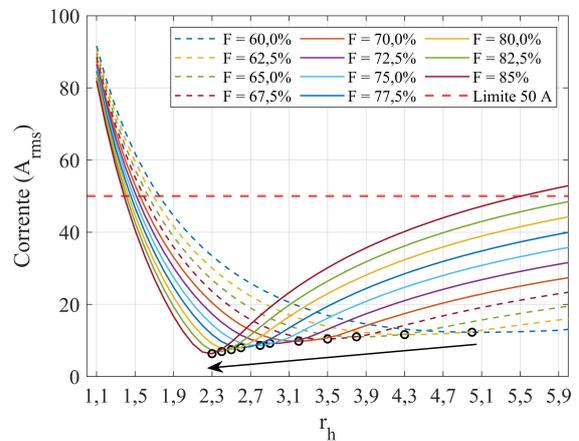
(g) $c_1/c_0 = 1,79$.



(h) $c_1/c_0 = 1,84$.



(i) $c_1/c_0 = 1,85$.



(j) $c_1/c_0 = 1,87$.

Fonte: Autoria Própria.

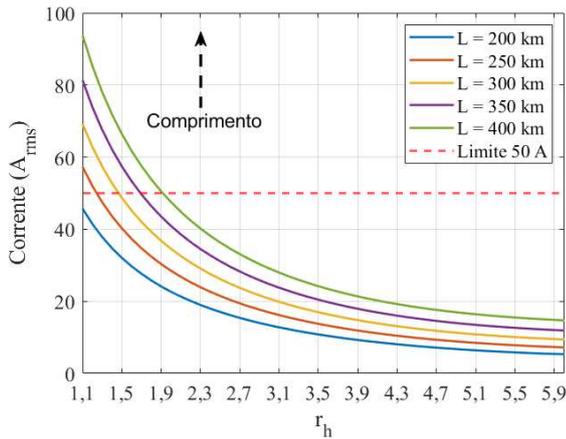
Outro comportamento interessante diz respeito à dispersão percebida nos locais referentes aos menores valores de corrente dos gráficos ao se alterar a relação c_1/c_0 da LT analisada. Ao verificar a Figura 5.5 (a), cujo valor é igual a 1,54, o aumento do nível de compensação de 60% para 85% ocasionou um $\Delta r_h = 0,7$. Em contrapartida, o mesmo cenário de variação da compensação para a simulação com $c_1/c_0 = 1,87$ apresenta uma diferença $\Delta r_h = 2,7$, o que infere uma diferença considerável no valor do reator X_n resultante.

Para a maioria dos casos, a diferença entre o r_h referente ao reator mínimo e ótimo foi reduzida para as LTs com os menores valores de c_1/c_0 , e isto fica mais evidente ao passo que o nível de compensação é menor. Por exemplo, ao comparar a corrente para 60% de compensação da Figura 5.5 (b) e 5.5 (g), notam-se variações entre o caso mínimo e ótimo de $\Delta r_h = 1,7$ e $\Delta r_h = 2,6$, respectivamente. Na prática, isso indica que seria necessário avaliar uma menor

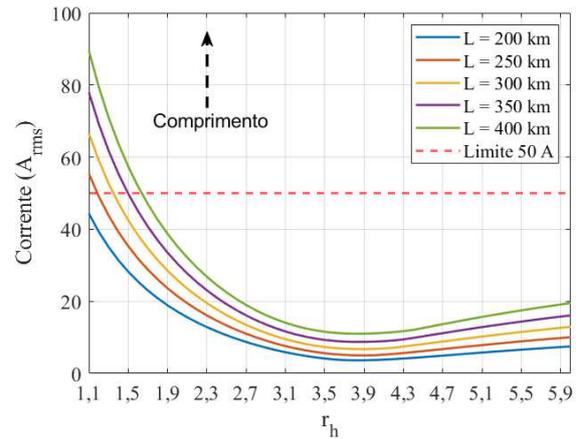
diversidade de possibilidades de reatâncias para aplicação entre o cenário mínimo e ótimo, o que poderia poupar tempo na análise durante a escolha do equipamento.

Na figura 5.6, são apresentados os resultados para $c_1/c_0 = 1,87$, ao se alterar o nível de compensação em conjunto com o comprimento da LT.

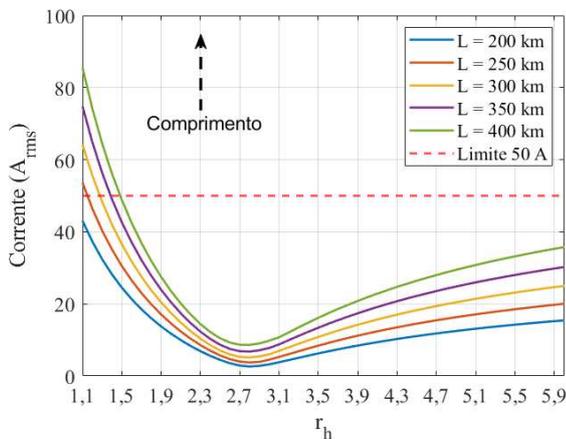
Figura 5.6: I_{rms} para diferentes níveis de compensação — $c_1/c_0 = 1,87$.



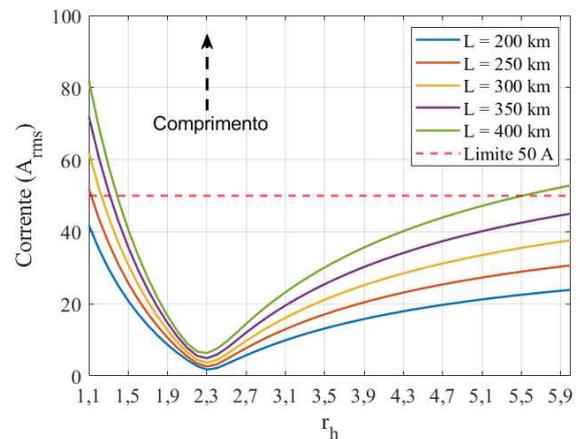
(a) 55% de compensação.



(b) 65% de compensação.



(c) 75% de compensação.



(d) 85% de compensação.

Fonte: Autoria Própria.

Conforme mencionado na seção anterior, o aumento do comprimento resultou nas maiores correntes registradas, mantendo-se o padrão entre curvas. Nota-se que este aumento tende a ser menos drástico próximos aos pontos considerados ótimos, à medida que os níveis de compensação são maiores, como na Figura 5.6 (d) onde a diferença de 200 km para 400 km resultou em um $\Delta I_{RMS} < 5$ A para $r_h = 2,3$.

Antes de empregar os dados extraídos dos gráficos para a realização do ajuste de curvas,

é crucial observar um aspecto importante na Figura 5.6 (a), cujo comportamento também foi notado para as demais linhas com níveis de compensação menos elevados. Nessa figura, é evidente que não há um ponto correspondente ao cenário ótimo dentro do intervalo de valores de r_h e isso ocorre devido ao fato do valor "ótimo" de r_h estar acima do limite máximo adotado nesta pesquisa ($r_h = 6$).

Apesar de tais curvas serem úteis para a análise das tensões e correntes das simulações e apresentar insumos para dedução de eventuais restrições, os valores de r_h correspondentes não são representativos para estimação das equações e devem ser desconsiderados para o ajuste de curva posterior, uma vez que não compõem os valores ótimos "reais" destes gráficos.

5.2 AJUSTE DE CURVAS

Nesta seção, apresentam-se três partes distintas. A primeira detalha os procedimentos para obter as equações e curvas referentes ao cenário ótimo, bem como a análise das equações resultantes. Na segunda parte, o foco está nos procedimentos relacionados à obtenção dos resultados para o cenário mínimo. Por fim, na terceira parte é discutida uma proposta para um cenário intermediário de obtenção do reator de neutro.

5.2.1 Cenário com reator ótimo

Nas Tabelas 5.2 e 5.3, estão sintetizados os resultados obtidos para as 10 LTs, 23 níveis de compensação e 5 comprimentos simulados. Os valores foram obtidos a partir do registro de r_h correspondente ao mínimo global de corrente e pico de tensão pós extinção da falta de cada gráfico gerado.

A análise das tabelas permite observar uma redução na quantidade de amostras úteis para a composição das curvas à medida que a relação c_1/c_0 aumenta, sendo esta uma limitação do valor máximo adotado na pesquisa. Para destacar os valores que não serão utilizados no ajuste de curvas, conforme mencionado ao final da seção anterior, foi adicionado um destaque em amarelo nos pontos descartados.

De forma geral, obtém-se valores de r_h mais elevados para linhas com maior relação c_1/c_0 . Isto pode ser notado ao se observar um nível de compensação fixo e comparar os dados para os comprimentos correspondentes. Além disso, ao manter a compensação constante para uma mesma LT, observou-se que o valor mínimo de r_h obtido graficamente não é alterado significativamente, sendo registrados majoritariamente desvios iguais a 0,1.

Este é um indicativo de que, ao invés de serem necessárias cinco curvas para representar $F \times r_h$ em cada LT, compondo um total de 55 curvas, seria factível a obtenção de uma aproximação válida com uma única curva média para descrever o comportamento da função no cenário ótimo.

Tabela 5.2: r_h em relação ao nível de compensação (Pt.1) - cenário ótimo.

F	c_1/c_0																								
	1,54					1,59					1,69					1,71					1,75				
	comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)				
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
0,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,325	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,35	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,375	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,4	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,425	5,0	6,0	5,6	5,6	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,45	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	5,4	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,475	3,7	3,8	3,8	3,7	3,7	4,7	4,8	4,8	4,8	4,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,5	3,3	3,4	3,3	3,2	3,2	4,1	4,2	4,1	4,1	4,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,525	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	3,6	3,7	3,6	3,5	3,5	4,6	4,7	4,7	4,8	4,8	5,2	5,1	5,1	5,1	5,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,55	2,7	2,8	2,7	2,7	2,6	3,3	3,2	3,2	3,2	3,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,2	4,6	4,5	4,5	4,5	4,4	4,9	5,0	4,9	4,9	4,8
0,575	2,5	2,6	2,5	2,5	2,4	3,0	3,0	2,9	2,9	2,8	3,6	3,6	3,7	3,7	3,6	3,9	3,9	3,8	3,8	3,8	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3
0,6	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,8	2,7	2,7	2,7	2,6	3,2	3,3	3,3	3,3	3,3	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,7	3,8	3,8	3,7	3,8
0,625	2,3	2,2	2,3	2,2	2,2	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,9	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5
0,65	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	3,1	3,2	3,1	3,2	3,2
0,675	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,6	2,6	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,6	2,7	2,6	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
0,7	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
0,725	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
0,75	1,9	1,9	1,8	1,9	1,8	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4
0,775	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	2,2	2,2	2,2	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3
0,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
0,825	1,7	1,7	1,8	1,7	1,7	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
0,85	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1

Fonte: Autoria Própria.

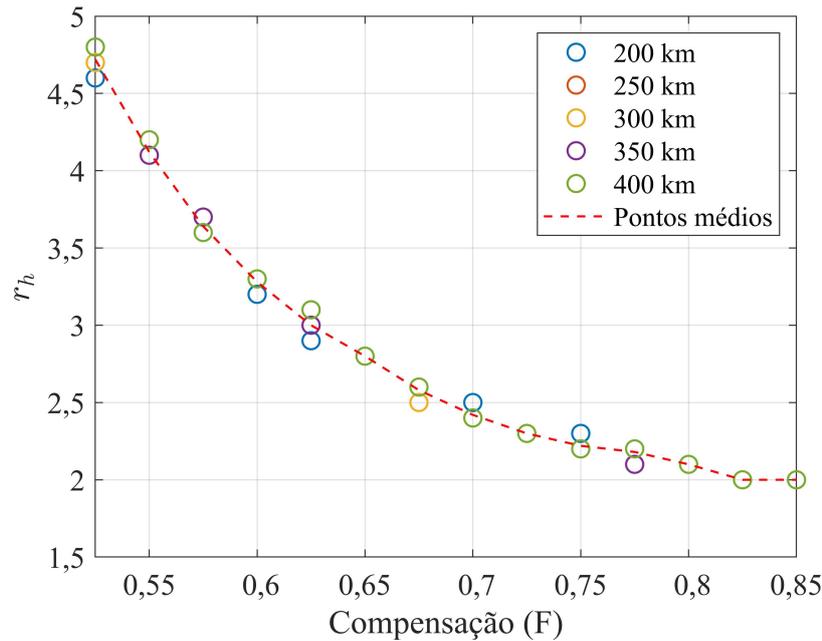
Tabela 5.3: r_h em relação ao nível de compensação (Pt.2) - cenário ótimo.

F	c_1/c_0																								
	1,78					1,79					1,84					1,85					1,87				
	comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)				
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
0,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,325	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,35	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,375	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,4	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,425	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,45	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,475	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,525	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,55	5,5	5,4	5,5	5,5	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,575	4,8	4,7	4,7	4,8	4,7	5,1	5,0	5,0	4,9	5,1	5,3	5,2	5,3	5,2	5,2	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,6	4,1	4,0	4,0	4,2	4,0	4,5	4,5	4,4	4,4	4,3	4,6	4,5	4,5	4,4	4,5	4,8	4,8	4,8	4,7	4,6	5,0	5,1	5,1	5,0	5,0
0,625	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,9	3,9	3,9	3,8	3,9	4,0	3,9	4,0	3,9	4,0	4,3	4,2	4,1	4,1	4,2	4,4	4,4	4,4	4,3	4,4
0,65	3,3	3,2	3,3	3,3	3,3	3,5	3,5	3,5	3,4	3,5	3,5	3,4	3,5	3,5	3,5	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,8	3,8	3,9	3,8	3,8
0,675	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,1	3,2	3,4	3,4	3,4	3,3	3,4	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
0,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	2,9	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1	3,1	3,0	3,1	3,2	3,3	3,2	3,2	3,2
0,725	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,8	2,8	2,7	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,9	2,9	2,9	2,8	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	2,9
0,75	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7
0,775	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
0,8	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,4	2,4	2,4	2,3	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
0,825	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
0,85	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3

Fonte: Autoria Própria.

Para fins de exemplificação, na Figura 5.7, com valor de c_1/c_0 igual a 1,69, são mostrados os pontos referentes a diferentes comprimentos, onde a linha tracejada representa a média dos pontos. Além disso, na Tabela 5.4 são apresentados os erros percentuais que tal aproximação ocasiona nos dados para diferentes comprimentos.

Figura 5.7: r_h médio para $c_1/c_0 = 1,69$.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5.4: Erros percentuais para aproximação de r_h pela média - $c_1/c_0 = 1,69$.

L (km)	Coeficientes $a * F^b + c$			Compensação (F)								erro (%)							
	a	b	c	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
Média	0,135	-4,831	1,687	5,53	4,11	3,28	2,77	2,44	2,23	2,08	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-
200	0,132	-4,791	1,720	5,38	4,04	3,25	2,76	2,45	2,24	2,11	2,01	2,71%	1,76%	0,93%	0,25%	0,29%	0,71%	1,01%	1,24%
250	0,139	-4,781	1,682	5,49	4,10	3,27	2,77	2,44	2,23	2,08	1,98	0,71%	0,37%	0,15%	0,02%	0,03%	0,04%	0,03%	0,00%
300	0,139	-4,794	1,672	5,52	4,11	3,28	2,77	2,44	2,22	2,08	1,97	0,09%	0,01%	0,01%	0,06%	0,15%	0,25%	0,34%	0,43%
350	0,134	-4,880	1,670	5,62	4,15	3,29	2,77	2,44	2,22	2,07	1,97	1,64%	0,97%	0,42%	0,02%	0,34%	0,56%	0,72%	0,83%
400	0,132	-4,903	1,689	5,64	4,17	3,31	2,78	2,45	2,23	2,08	1,98	1,99%	1,31%	0,81%	0,45%	0,23%	0,09%	0,01%	0,02%

Fonte: Autoria Própria.

A análise dos erros mostra que a média resulta em um conjunto de pontos cuja imagem da função se aproxima satisfatoriamente dos dados originais, sendo o maior erro observado na compensação de 50% para 200 km, com valor de 2,7%, dentro do intervalo de compensação estudado. O mesmo procedimento foi adotado para as demais LTs e os resultados podem ser avaliados no anexo B.11, com maior erro correspondente a 3,14%. A Tabela 5.5 sumariza os

pontos médios de r_h resultantes desta análise, onde destacam-se novamente marcações para os valores não utilizados no ajuste de curvas, por constituírem limitações referentes ao estudo.

Tabela 5.5: Valores médios de r_h para diferentes LTs - cenário ótimo.

F	c_1/c_0									
	1,54	1,59	1,69	1,71	1,75	1,78	1,79	1,84	1,85	1,87
0,3	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,325	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,35	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,375	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,4	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,425	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,45	4,4	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,475	3,7	4,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,5	3,3	4,1	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,525	2,9	3,6	4,7	5,1	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
0,55	2,7	3,2	4,1	4,5	4,9	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0
0,575	2,5	2,9	3,6	3,8	4,3	4,7	5,0	5,2	6,0	6,0
0,6	2,4	2,7	3,3	3,4	3,8	4,1	4,4	4,5	4,7	5,0
0,625	2,2	2,5	3,0	3,1	3,4	3,6	3,9	4,0	4,2	4,4
0,65	2,1	2,4	2,8	2,9	3,2	3,3	3,5	3,5	3,7	3,8
0,675	2,0	2,3	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,2	3,4	3,5
0,7	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	2,9	3,1	3,2
0,725	1,9	2,1	2,3	2,4	2,6	2,6	2,8	2,7	2,9	3,0
0,75	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7	2,8
0,775	1,8	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6
0,8	1,8	1,9	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5
0,825	1,7	1,8	2,0	2,0	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4
0,85	1,7	1,8	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3

Fonte: Autoria Própria.

5.2.1.1 Obtenção dos coeficientes

A partir dos dados da tabela anterior e utilizando o modelo da série de potências de dois termos, mostrado na equação 5.1, foram calculados os coeficientes a , b e c a partir do ajuste de curvas empregado, sendo estes valores usados para reconstrução das curvas que relacionam o nível de compensação com o valor de r_h ($F \times r_h$), para as demais faixas de compensações não contempladas anteriormente.

$$r_h = aF^b + c. \quad (5.1)$$

Além disso, na etapa de avaliação individual do comportamento dos coeficientes a , b , e c entre as diferentes linhas, constatou-se que estes também poderiam ser aproximados por um ajuste de curvas, conforme indicado nas equações 5.2, 5.3 e 5.4, onde $A_{1..3}$, $B_{1..3}$ e $C_{1..3}$ correspondentem aos valores numéricos obtidos a partir da aplicação do segundo ajuste de curvas. Essa abordagem busca generalizar o processo, permitindo estimar novos coeficientes com base em valores de c_1/c_0 para outras linhas.

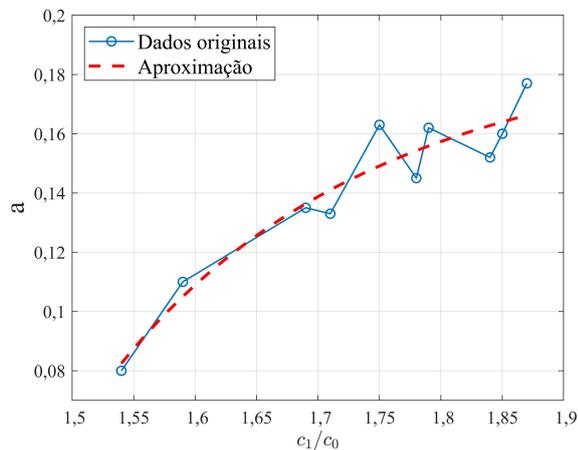
$$a = A_1 \left(\frac{c_1}{c_0} \right)^{B_1} + C_1. \quad (5.2)$$

$$b = A_2 \left(\frac{c_1}{c_0} \right)^{B_2} + C_2. \quad (5.3)$$

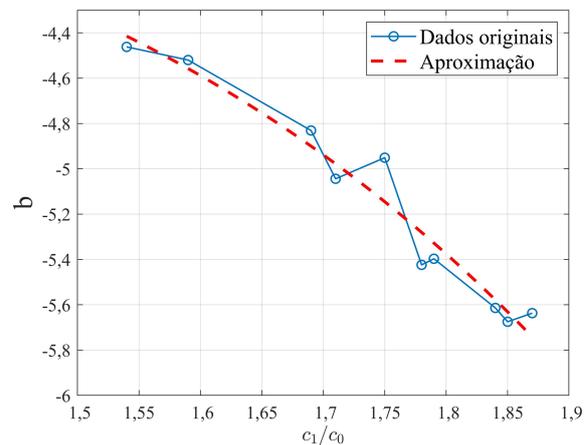
$$c = A_3 \left(\frac{c_1}{c_0} \right)^{B_3} + C_3. \quad (5.4)$$

A aproximação é representada na Figura 5.8, onde os pontos em azul indicam a variação dos coeficientes em relação à LT e a linha tracejada em vermelho indica a aproximação adotada.

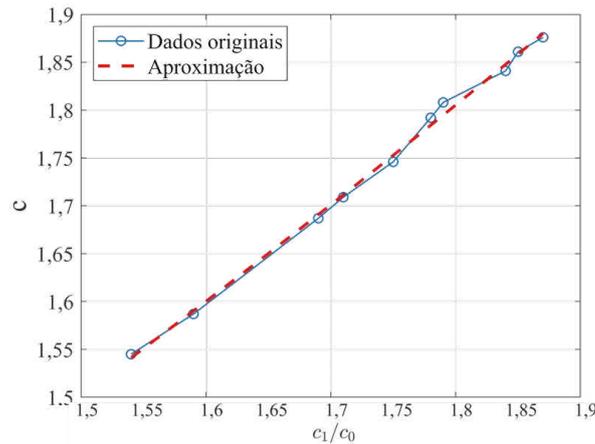
Figura 5.8: Aproximação das curvas para os coeficientes das equações - cenário ótimo.



(a) $a \times c_1/c_0$



(b) $b \times c_1/c_0$

(c) $c \times c_1/c_0$

Fonte: Autoria Própria.

As funções resultantes das aproximações são apresentadas a seguir para a , b e c .

$$a = -2,3115\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^{-6,9952} + 0,19521.$$

$$b = -0,11023\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^{4,7786} - 3,5469.$$

$$c = 0,50291\left(\frac{c_1}{c_0}\right)^{1,5349} + 0,56556.$$

Os valores dos coeficientes originais são listados na Tabela 5.6, em conjunto com os valores aproximados e erros percentuais associados. Nota-se que em geral, para as variáveis b e c , os valores se mantiveram consideravelmente próximos das referências, indicando discrepâncias máximas de 3,77% e 0,75%, respectivamente. Vale destacar a variável c , cujo valor se aproxima significativamente de c_1/c_0 em todos os cenários, como ilustrado pelo comportamento mostrado na Figura 5.8 (c). Esse resultado sugere a possibilidade de uma proporcionalidade direta entre a variável c e c_1/c_0 da LT, conforme exemplificado na expressão a seguir.

$$c_1/c_0 \approx c.$$

Por outro lado, os maiores erros foram observados na variável a , alcançando um valor máximo foi 9,40 % para a linha de $c_1/c_0 = 1,75$. De fato, ao se observar a Figura 5.8 a) e b), fica evidente que o ponto correspondente a esta linha foi o que mais se afastou da tendência dos dados, podendo isso ser efeito de imprecisões na simulação e à alta sensibilidade dos coeficientes resultantes no ajuste de curvas.

Tabela 5.6: Comparação dos coeficientes médios com a aproximação para diferentes LTs.

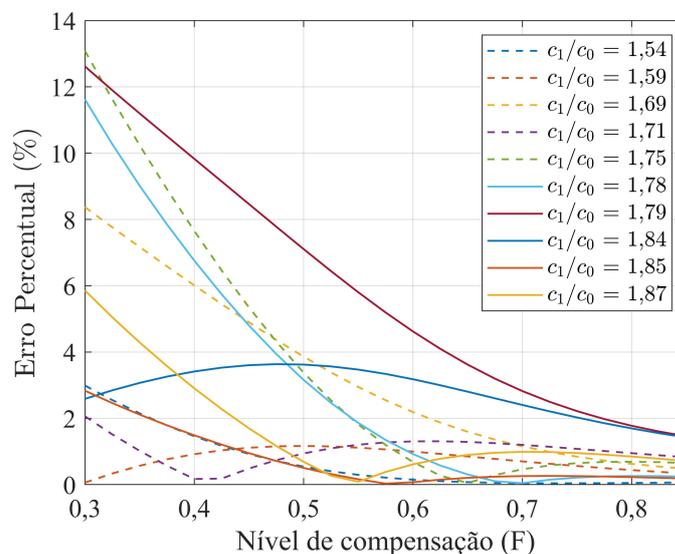
c_1/c_0	Coeficientes $a * F^b + c$						Erro (%)		
	Médios			Aproximação			a	b	c
	a	b	c	a	b	c			
1,54	0,08	-4,462	1,545	0,082	-4,415	1,541	-2,44%	1,06%	0,26%
1,59	0,11	-4,52	1,587	0,105	-4,558	1,59	4,76%	-0,83%	-0,19%
1,69	0,135	-4,831	1,687	0,136	-4,9	1,691	-0,74%	-1,41%	-0,24%
1,71	0,133	-5,044	1,709	0,141	-4,978	1,711	-5,67%	1,33%	-0,12%
1,75	0,163	-4,951	1,746	0,149	-5,145	1,753	9,40%	-3,77%	-0,40%
1,78	0,145	-5,424	1,792	0,154	-5,281	1,784	-5,84%	2,71%	0,45%
1,79	0,162	-5,397	1,808	0,156	-5,328	1,795	3,85%	1,30%	0,72%
1,84	0,152	-5,614	1,841	0,163	-5,578	1,848	-6,75%	0,65%	-0,38%
1,85	0,16	-5,675	1,861	0,164	-5,631	1,858	-2,44%	0,78%	0,16%
1,87	0,177	-5,637	1,876	0,166	-5,741	1,88	6,63%	-1,81%	-0,21%

Fonte: Autoria Própria.

Para compreender se as aproximações destes coeficientes são validas e conseguem representar satisfatoriamente os dados de interesse, foram gerados os gráficos que relacionam a compensação reativa com o valor de r_h , com a equação 5.1, e comparados com os valores de r_h originais.

Os resultados são apresentados na Figura 5.9 e demonstram que o impacto deste ajuste na faixa de compensação é reduzido para a maioria das LTs, sendo observados erros acima de 10% somente para 3 casos, cujas compensações se encontravam abaixo de 40%. Além disso, para compensações acima de 60%, não foram observados erros maiores do que 5%.

Figura 5.9: Erro percentual - r_h em relação a compensação reativa.

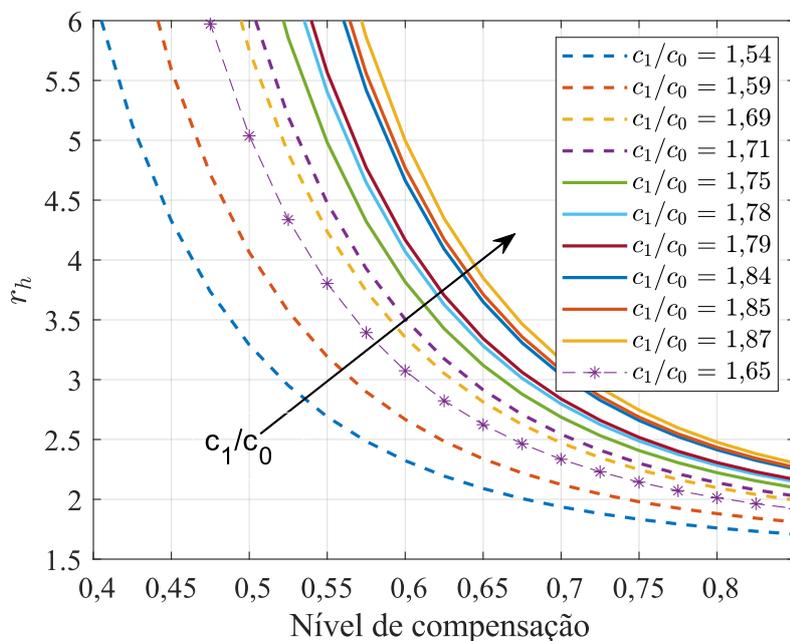


Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma, no cenário ideal, as curvas que relacionam o fator r_h com os níveis de compensação podem ser observadas na Figura 5.10. Com base nestas curvas ou nas equações mencionadas anteriormente, pode-se encontrar os respectivos valores de reatância de neutro X_n e reproduzir os resultados para todas as linhas adotadas no trabalho.

Além disso, é possível obter resultados para linhas que não compuseram o conjunto de dados originais, como por exemplo a curva referente a LT com relação $c_1/c_0 = 1,65$, cujos coeficientes foram obtidos a partir das equações apresentadas, e podem ser utilizados como base para determinação dos respectivos reatores de neutro, para o nível de compensação desejado.

Figura 5.10: Razão r_h para diferentes LTs em função da compensação reativa para o cenário ótimo.



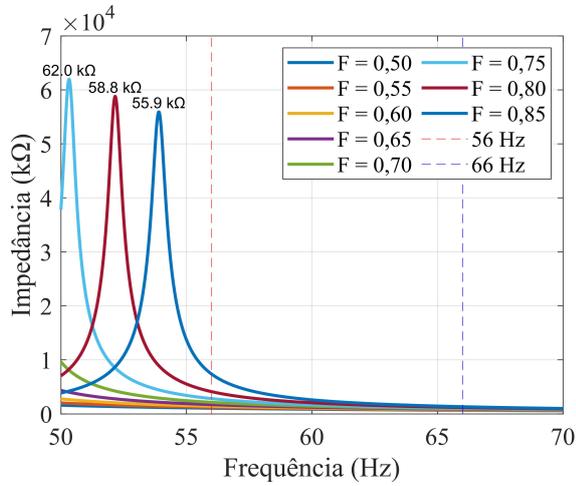
Fonte: Autoria Própria.

5.2.1.2 Avaliações de ressonâncias e correntes eficazes

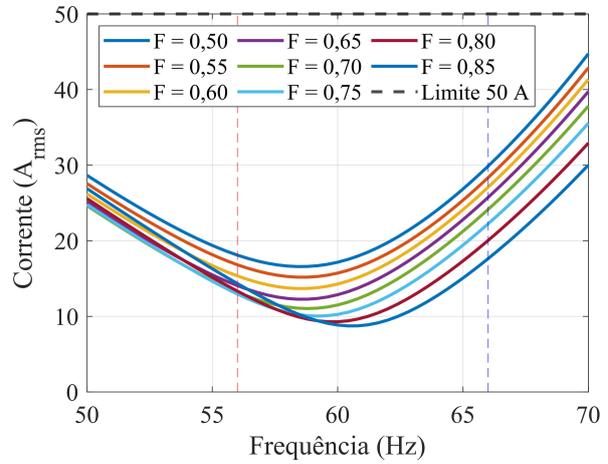
Nesta etapa, os reatores foram calculados com as equações apresentadas anteriormente. Após isso, foram realizadas simulações com uso do recurso *Frequency Scan* para identificar se a inclusão destes valores acarretaria a presença de ressonâncias entre 56 Hz e 66 Hz. A seguir, na Figura 5.11, são mostrados os resultados obtidos para todas as LTs estudadas, explicitando a impedância $Z(j\omega)$ sob o ponto de vista da fase aberta e o valor eficaz da corrente de arco

secundário.

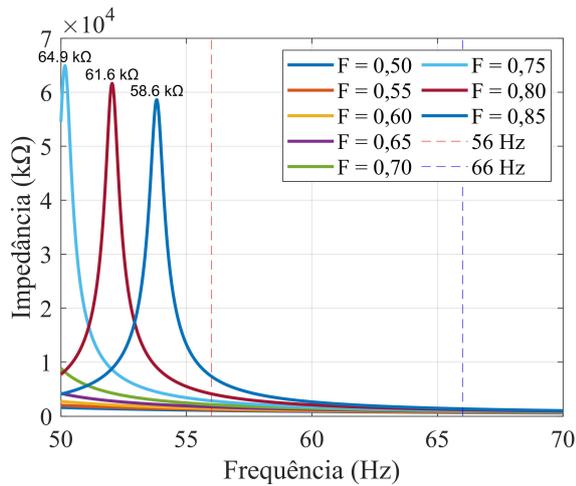
Figura 5.11: Corrente I_{rms} e Tensões na faixa de 56 - 66 Hz.



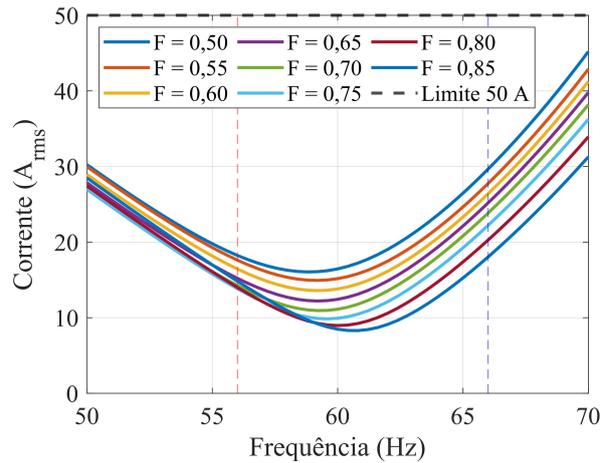
(a) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,54$



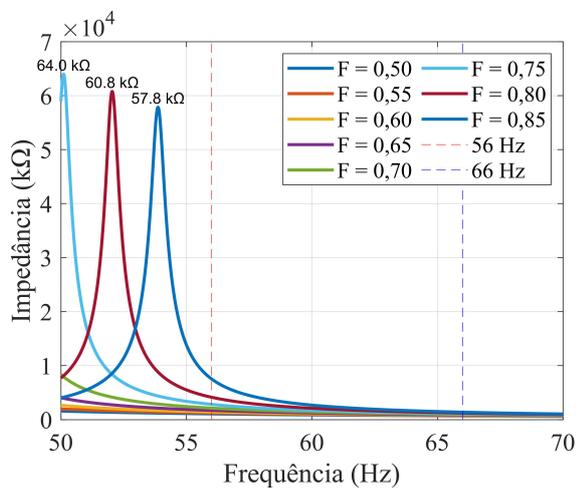
(b) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,54$



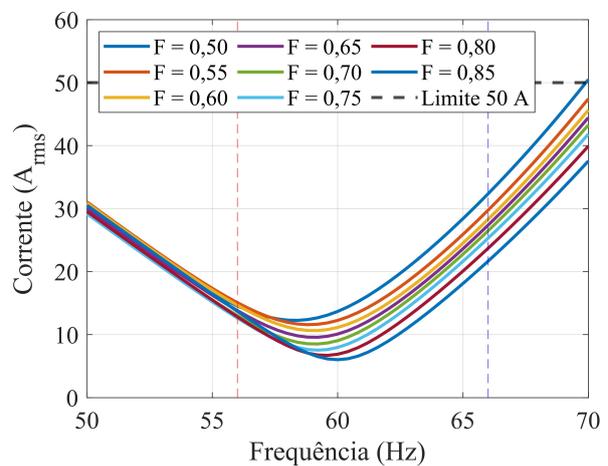
(c) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,59$



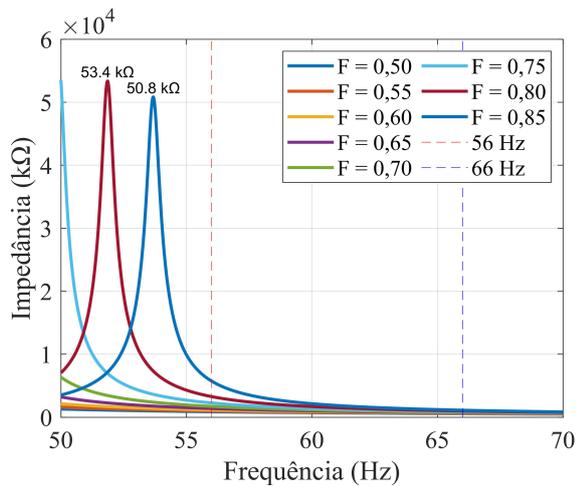
(d) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,59$



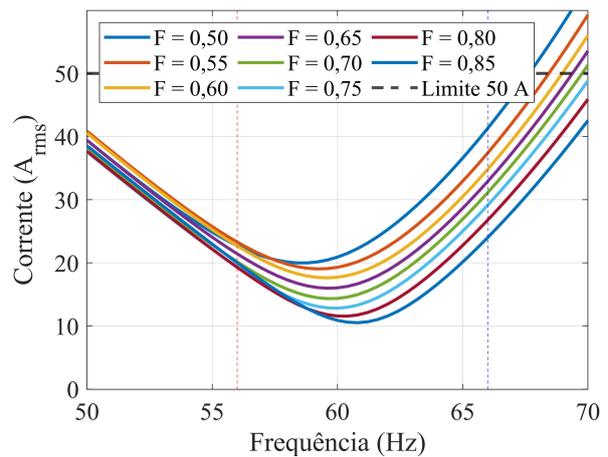
(e) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,69$



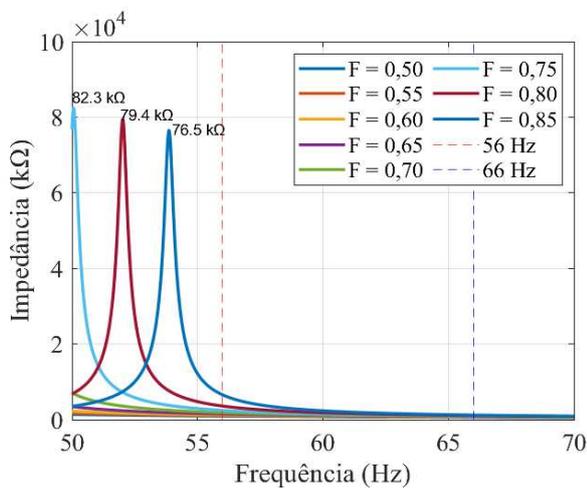
(f) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,69$



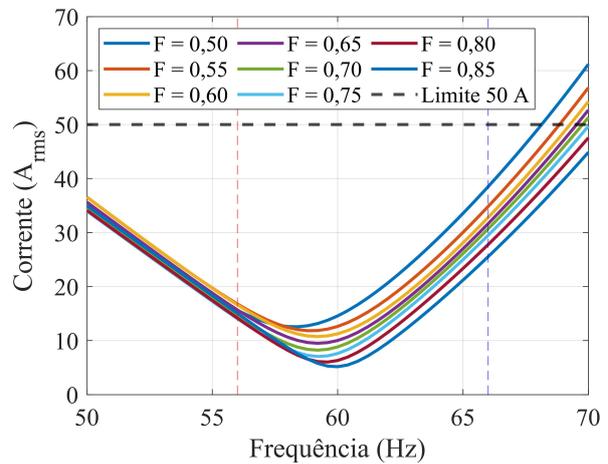
(g) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,71$



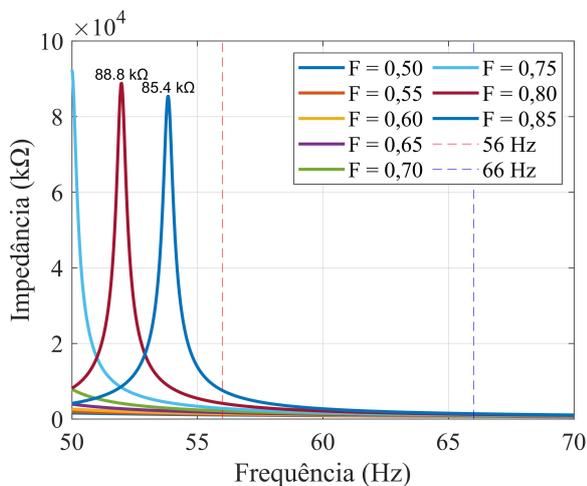
(h) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,71$



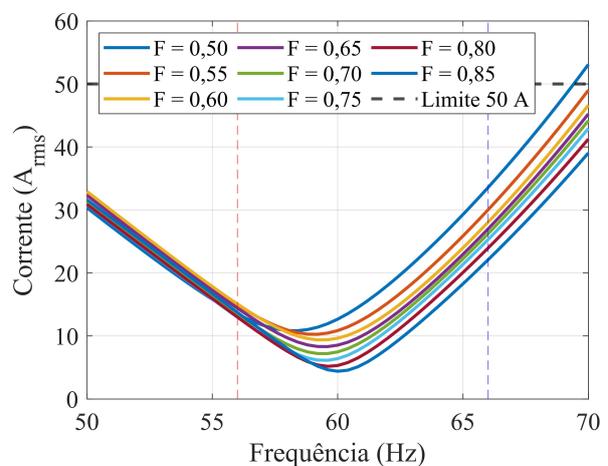
(i) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,75$



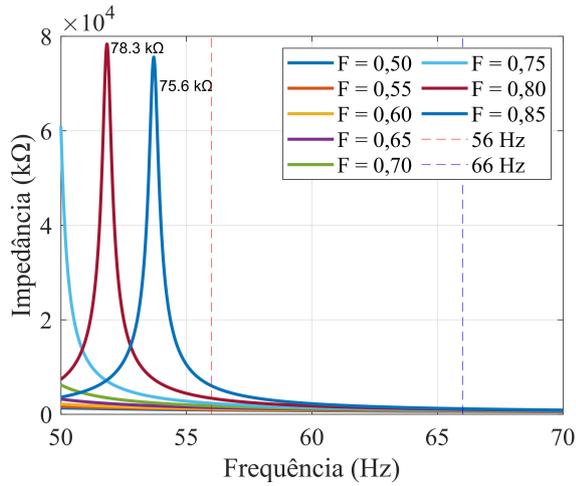
(j) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,75$



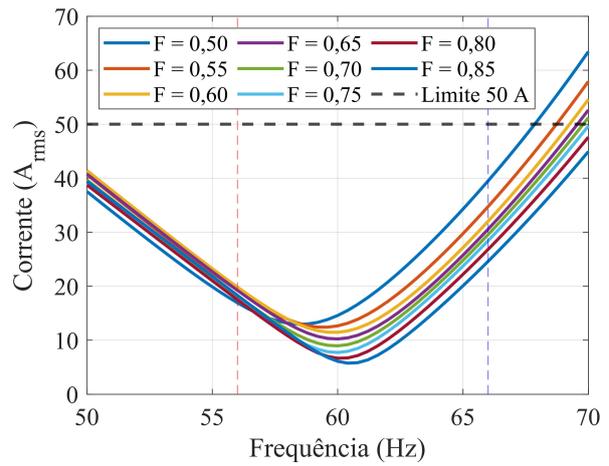
(k) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,78$



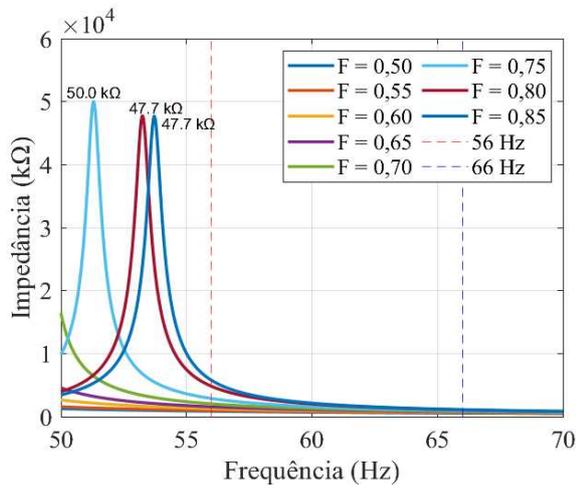
(l) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,78$



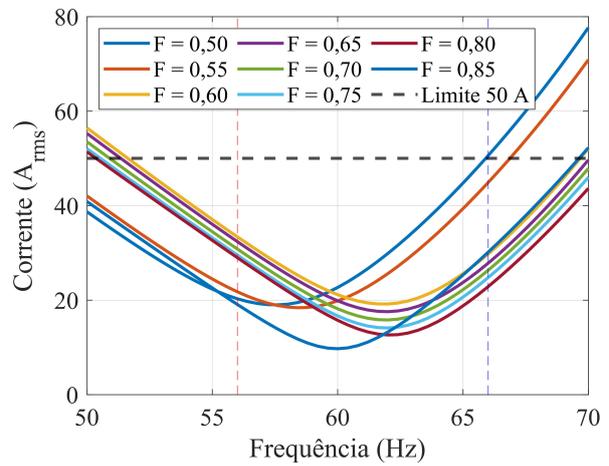
(m) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,79$



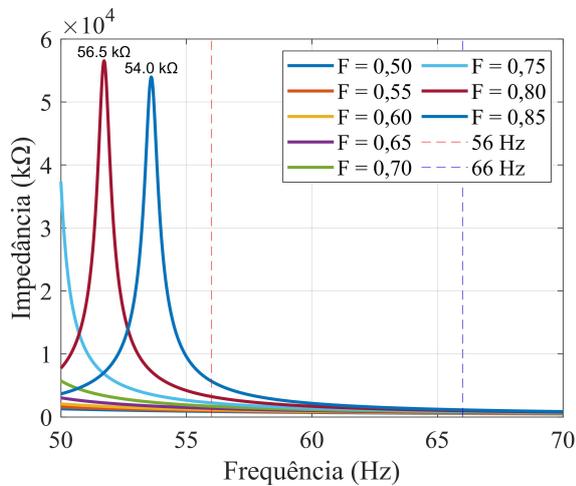
(n) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,79$



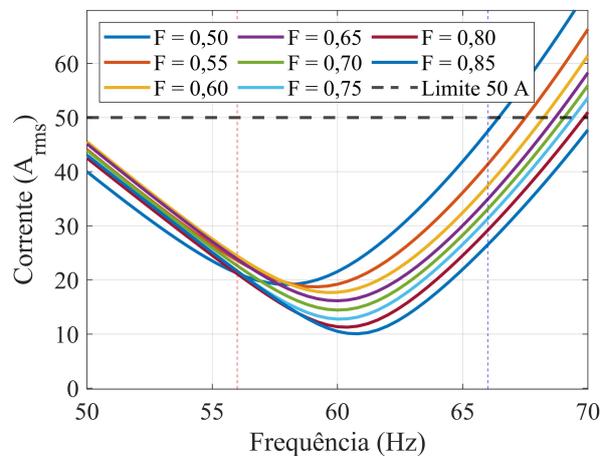
(o) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,84$



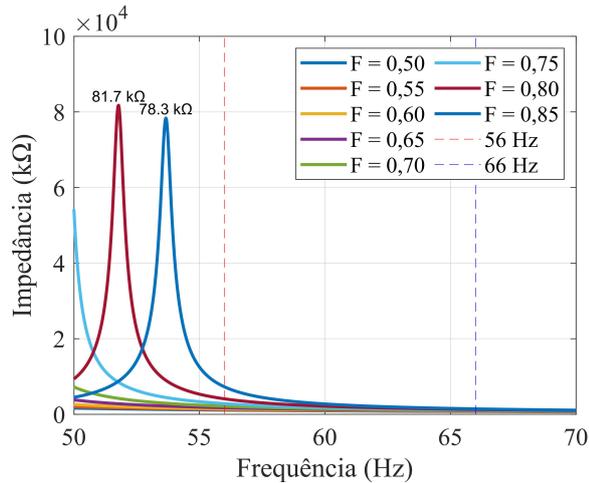
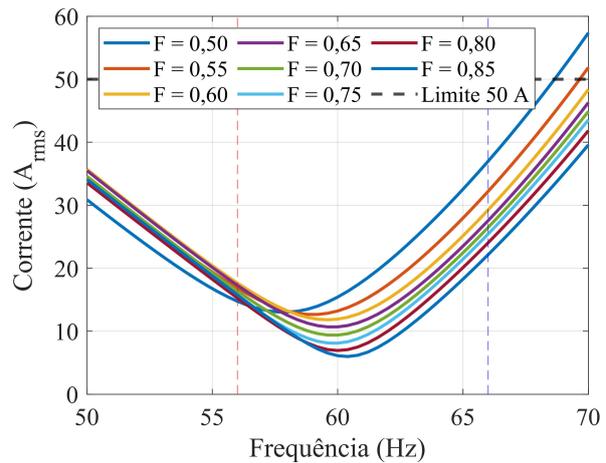
(p) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,84$



(q) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,85$



(r) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,85$

(s) Fase aberta - $c_1/c_0 = 1,87$ (t) I_{rms} - $c_1/c_0 = 1,87$

Fonte: Autoria Própria.

De forma geral, dentro da faixa alvo da análise não foram observadas ressonâncias, sendo o maior valor encontrado em 56 Hz com aproximadamente 7,5 kV. Para valores inferiores a 53,9 Hz, notou-se o aparecimento de pontos de ressonância para níveis de compensação acima de 70%, em frequências distintas, aumentando à medida que a compensação reativa da LT diminuiu. O maior valor obtido foi 88,8 kΩ em 52 Hz, referente à LT com $c_1/c_0 = 1,78$ na Figura 5.11 (k).

Observando a tendência da impedância $Z(jw)$, para níveis de compensação mais baixos espera-se que sejam obtidas ressonâncias mais elevadas com frequências menores e mais distantes do intervalo de interesse, logo, apesar da existência destes pontos, estes valores não se configuram como um problema devido à frequência nas quais estão localizados.

No caso da corrente eficaz, dado que as equações foram deduzidas a partir de pontos considerados com corrente mínima, de fato esperava-se que a amplitude de I_{rms} fosse mantida abaixo do limite e as simulações servem para comprovar este comportamento. O valor eficaz I_{60Hz} para todos os níveis de compensação coincide exatamente com a corrente obtida para simulação no domínio do tempo e as demais frequências dependem da alteração das fontes do circuito.

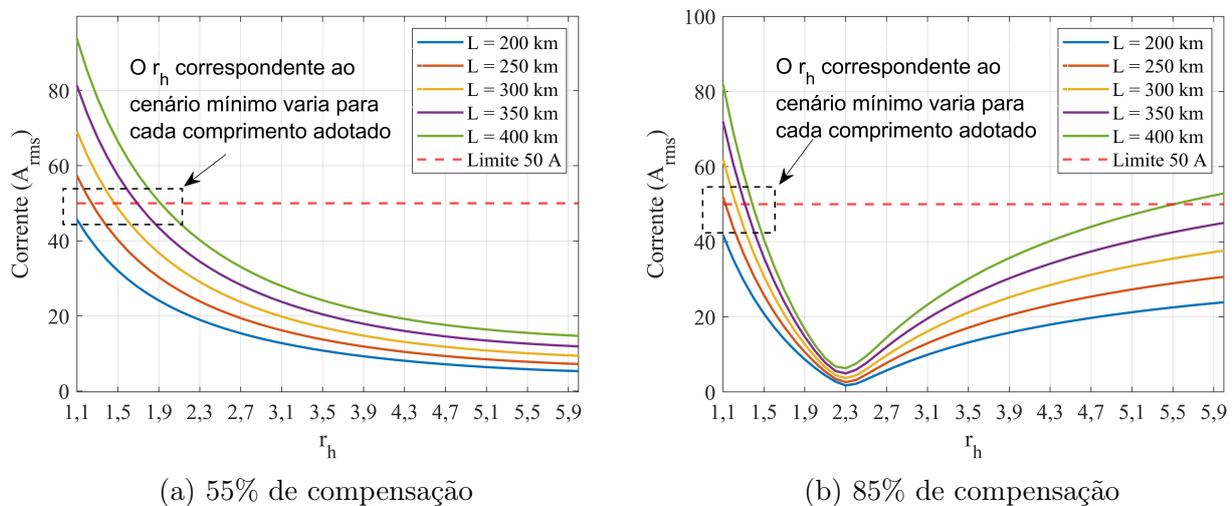
Nos resultados foi identificado somente um caso, presente na Figura 5.11 (p) com 50% de compensação, para o qual a corrente eficaz excede o limite de 50 A no extremo superior da faixa de frequência. Nestas circunstâncias, é importante avaliar uma alteração no valor do reator e notar também que a diminuição da compensação reativa irá deslocar verticalmente os gráficos,

podendo passar a existir restrições que indiquem a necessidade de adequação do reator de neutro também para outras compensações.

5.2.2 Cenário com reator mínimo

Para obtenção do conjunto de reatores com os menores valores, foi adotado o mesmo procedimento utilizado nas curvas para o caso ótimo, porém com o registro dos primeiros pontos imediatamente abaixo do limite de 50 A para cada comprimento. Nas Figuras 5.12 (a) e 5.12 (b) são apresentadas as curvas de corrente eficaz em relação a diferentes valores de r_h , referentes à LT com uma relação de c_1/c_0 igual a 1,87 para dois níveis de compensação distintos, nas quais os retângulos tracejados adicionados em cada imagem indicam os trechos de interesse para coleta dos valores e construção das curvas $r_h \times F$.

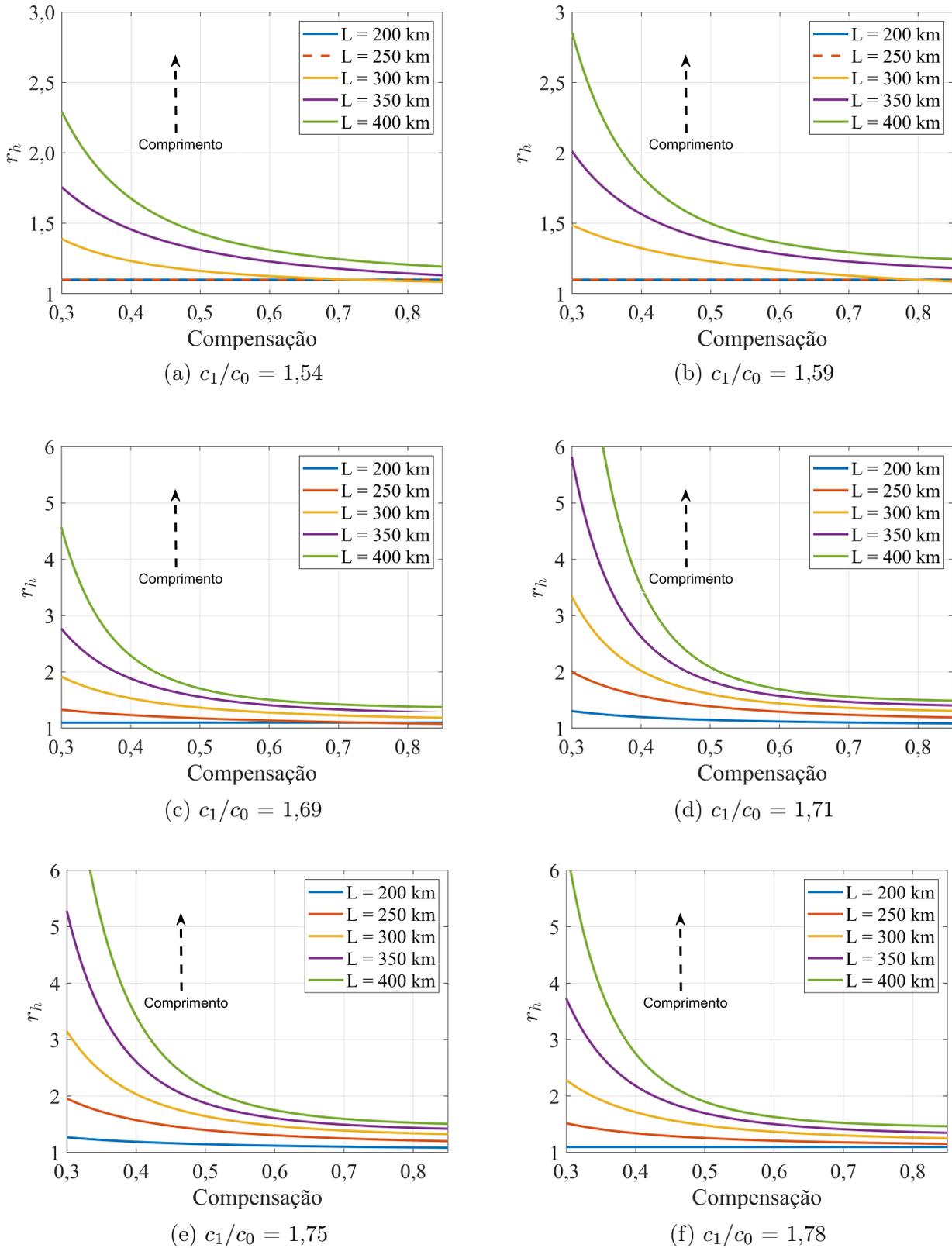
Figura 5.12: Deslocamento de r_h para o caso mínimo - $c_1/c_0 = 1,87$.

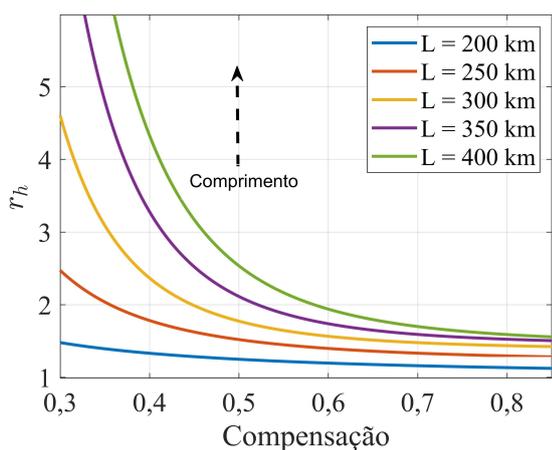


Fonte: Autoria Própria.

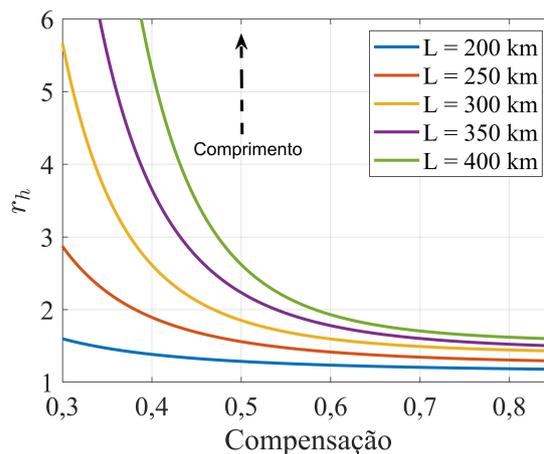
Os resultados das curvas $r_h \times F$ para as 10 linhas sob estudo são apresentados na Figura 5.13. De forma geral, observa-se um padrão consistente em relação ao aumento da inclinação das curvas mediante maiores comprimentos. Para um mesmo nível de compensação, o aumento do comprimento da linha demanda um maior r_h , e essa discrepância fica particularmente acentuada para menores níveis de compensação reativa.

Figura 5.13: r_h para diferentes LTs em função da compensação reativa para o cenário mínimo.

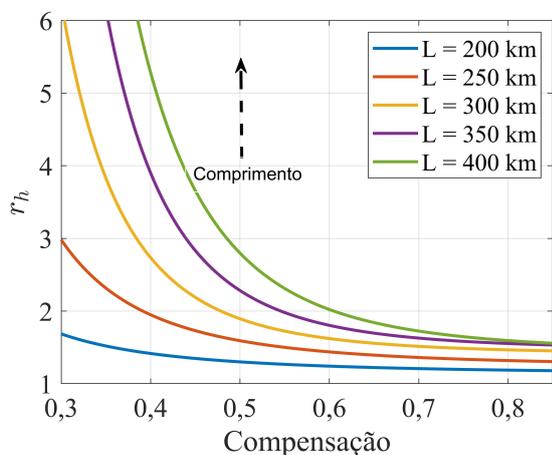




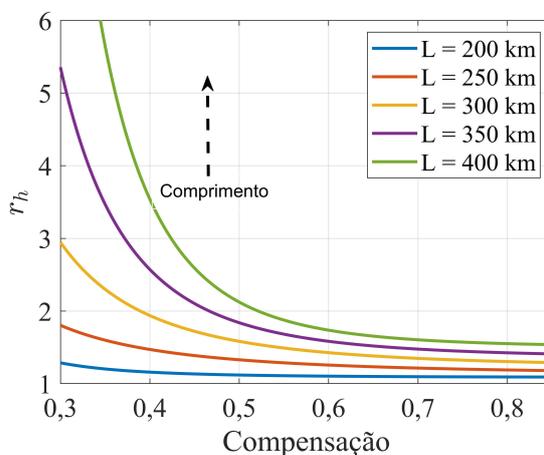
(g) $c_1/c_0 = 1,79$



(h) $c_1/c_0 = 1,84$



(i) $c_1/c_0 = 1,85$



(j) $c_1/c_0 = 1,87$

Fonte: Autoria Própria.

Por exemplo, ao comparar os valores da Figura 5.13 (c), em comprimentos de 200 km e 400 km, a diferença percentual em r_h percebida é de 74% para o nível de compensação relativa de 45%, com r_h variando de 1,1 para 1,914. Em contraste, para a mesma LT com 85% de compensação, a diferença causada pelo aumento do comprimento foi de cerca de 25%, com alteração de r_h de 1,1 para 1,375.

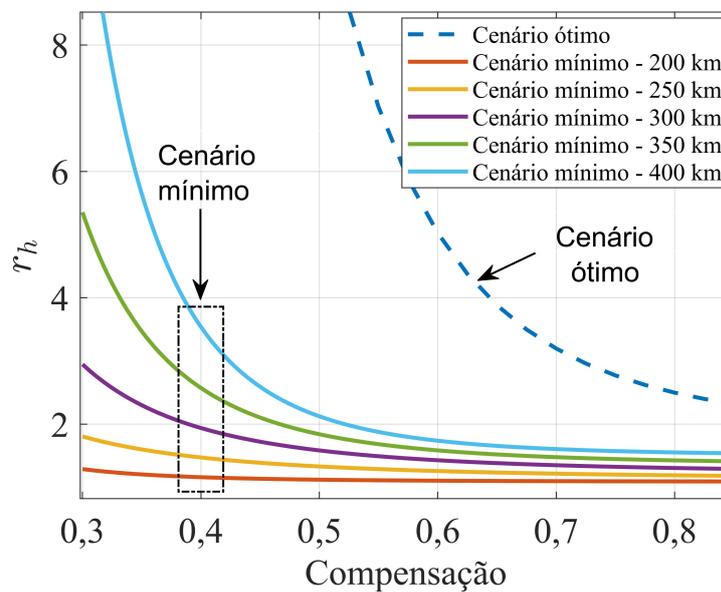
Essa tendência pode ser estendida para as demais linhas do estudo, como também é evidente no exemplo anterior apresentado na Figura 5.12. Para 55% de compensação, a diferença Δr_h entre comprimentos de 200 km e 400 km foi de 0,9, enquanto para 85% de compensação, a diferença Δr_h foi de 0,3.

No que diz respeito aos casos das Figuras 5.13 (a) e (b), foram observados que para os comprimentos de 200 e 250 km, especificamente, o valor de r_h ficou fixado em 1,1.

Este resultado pode levar a algumas discussões distintas, onde primeiramente é necessário avaliar se a presença do reator de neutro é realmente adequada, dado que as correntes de curto-circuito são naturalmente menos elevadas devido à extensão da LT. Caso seja de fato comprovada a necessidade do reator, para por exemplo deslocar pontos de ressonância, o menor valor de r_h adotado no estudo seria suficiente em todos os níveis de compensação. Entretanto, é importante salientar que nestes casos, o valor de r_h não necessariamente corresponde ao menor reator possível, já que existem margens menores que 1,1 que poderiam ser adotadas. Uma dedução similar também foi obtida considerando 200 km para as LTs com $c_1/c_0 = 1,69$ e $1,78$, nas Figuras 5.13 (c) e (f), respectivamente.

Na Figura 5.14 são apresentadas as curvas referentes aos dois casos abordados até o momento, para a linha com $c_1/c_0 = 1,87$. Fica nitidamente evidente a influência do comprimento no cenário mínimo em contraste com o cenário ótimo.

Figura 5.14: Comparação de cenários c_1/c_0 - Ótimo x Mínimo



Fonte: Autoria Própria

A Tabelas 5.7 e 5.8 a seguir sintetizam os resultados obtidos para o cenário mínimo, nos quais são indicados os casos nos quais o valor de r_h correspondeu ao limite superior adotado na pesquisa, sendo estes não utilizados no ajuste de curvas pelos motivos apresentados na seção anterior.

Tabela 5.7: r_h em relação ao nível de compensação (Pt.1) - cenário mínimo

F	c_1/c_0																								
	1,54					1,59					1,69					1,71					1,75				
	comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)				
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
0,3	1,1	1,1	1,4	1,8	2,3	1,1	1,1	1,5	2,0	2,9	1,1	1,3	1,9	2,8	4,7	1,3	2,0	3,4	6,0	6,0	1,3	2,0	3,2	6,0	6,0
0,325	1,1	1,1	1,3	1,6	2,1	1,1	1,1	1,4	1,9	2,4	1,1	1,3	1,8	2,4	3,5	1,3	1,9	2,8	4,6	6,0	1,2	1,8	2,7	4,3	6,0
0,35	1,1	1,1	1,3	1,6	1,9	1,1	1,1	1,4	1,7	2,2	1,1	1,3	1,7	2,2	2,9	1,2	1,7	2,4	3,5	5,8	1,2	1,7	2,4	3,4	5,2
0,375	1,1	1,1	1,3	1,5	1,7	1,1	1,1	1,4	1,6	2,0	1,1	1,3	1,6	2,0	2,5	1,2	1,6	2,2	3,0	4,2	1,2	1,6	2,2	2,9	4,0
0,4	1,1	1,1	1,2	1,4	1,7	1,1	1,1	1,3	1,6	1,8	1,1	1,2	1,5	1,9	2,3	1,2	1,6	2,0	2,6	3,4	1,2	1,6	2,0	2,6	3,3
0,425	1,1	1,1	1,2	1,4	1,6	1,1	1,1	1,3	1,5	1,7	1,1	1,2	1,5	1,8	2,1	1,2	1,5	1,9	2,3	2,9	1,2	1,5	1,9	2,3	2,9
0,45	1,1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,1	1,1	1,3	1,5	1,6	1,1	1,2	1,4	1,7	2,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,6	1,2	1,5	1,8	2,2	2,6
0,475	1,1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,1	1,1	1,2	1,4	1,6	1,1	1,2	1,4	1,6	1,9	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3	1,2	1,4	1,7	2,0	2,3
0,5	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,2	1,4	1,5	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2
0,525	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,1	1,2	1,3	1,5	1,7	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1
0,55	1,1	1,1	1,1	1,3	1,4	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0
0,575	1,1	1,1	1,1	1,2	1,4	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,3	1,4	1,6	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
0,6	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8
0,625	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,1	1,3	1,5	1,6	1,7
0,65	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,1	1,1	1,3	1,4	1,5	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7
0,675	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6
0,7	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6
0,725	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6
0,75	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,1	1,2	1,4	1,4	1,5
0,775	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,8	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,825	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,85	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5.8: r_h em relação ao nível de compensação (Pt.2) - cenário mínimo

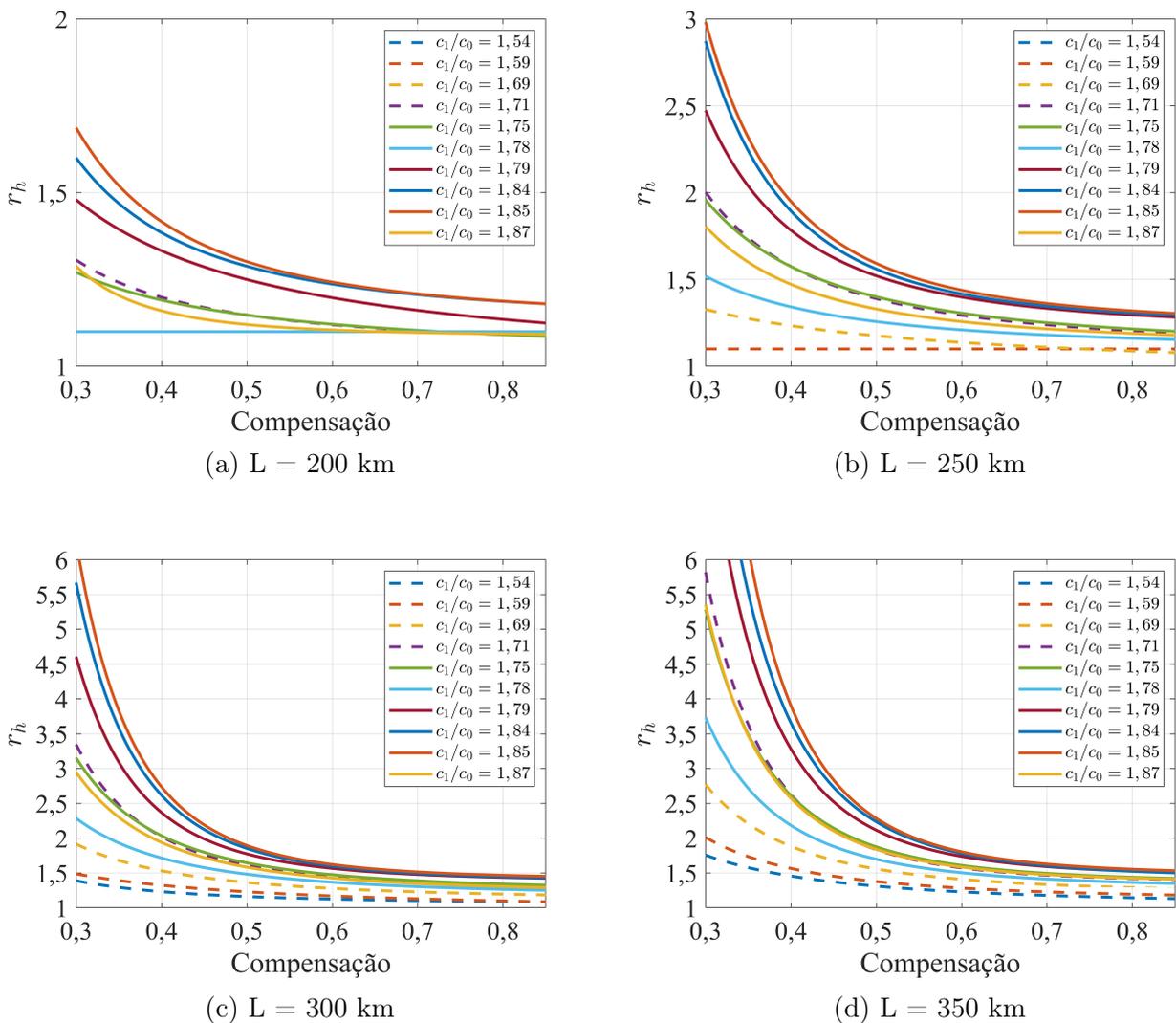
F	c_1/c_0																								
	1,78					1,79					1,84					1,85					1,87				
	comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)					comprimento (km)				
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
0,3	1,1	1,5	2,3	3,8	6,0	1,5	2,5	4,7	6,0	6,0	1,6	2,9	6,0	6,0	6,0	1,7	3,0	6,0	6,0	6,0	1,3	1,8	3,0	6,0	6,0
0,325	1,1	1,5	2,1	3,1	5,0	1,4	2,2	3,6	6,0	6,0	1,5	2,5	4,5	6,0	6,0	1,6	2,6	4,9	6,0	6,0	1,2	1,7	2,5	4,3	6,0
0,35	1,1	1,4	1,9	2,6	3,8	1,4	2,0	3,0	4,9	6,0	1,5	2,2	3,5	6,0	6,0	1,5	2,3	3,7	6,0	6,0	1,2	1,6	2,3	3,4	5,8
0,375	1,1	1,4	1,8	2,4	3,1	1,4	1,9	2,6	3,8	6,0	1,4	2,0	2,9	4,5	6,0	1,4	2,1	3,1	4,9	6,0	1,2	1,5	2,1	2,9	4,2
0,4	1,1	1,3	1,7	2,2	2,7	1,3	1,8	2,4	3,2	4,4	1,4	1,9	2,6	3,6	5,4	1,4	1,9	2,7	3,8	6,0	1,2	1,5	1,9	2,5	3,4
0,425	1,1	1,3	1,6	2,0	2,4	1,3	1,7	2,2	2,8	3,6	1,4	1,8	2,3	3,0	4,1	1,4	1,8	2,4	3,2	4,4	1,2	1,4	1,8	2,3	2,9
0,45	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2	1,3	1,6	2,0	2,5	3,1	1,3	1,7	2,2	2,7	3,4	1,4	1,7	2,2	2,8	3,6	1,1	1,4	1,7	2,1	2,6
0,475	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,8	1,3	1,6	2,0	2,4	3,0	1,4	1,7	2,1	2,5	3,1	1,1	1,4	1,7	2,0	2,4
0,5	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	1,3	1,6	1,9	2,3	2,8	1,1	1,3	1,6	1,9	2,2
0,525	1,1	1,2	1,5	1,7	1,9	1,2	1,5	1,8	2,0	2,3	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1
0,55	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0
0,575	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
0,6	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	1,2	1,5	1,7	1,9	2,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8
0,625	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7
0,65	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7
0,675	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6
0,7	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6
0,725	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
0,75	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,775	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,8	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,825	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,3	1,4	1,5	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,85	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,1	1,3	1,4	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,4	1,6	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4

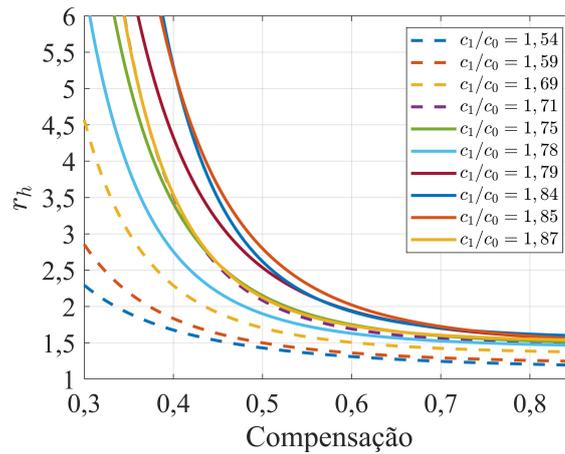
Fonte: Autoria Própria.

A abordagem para obtenção do reator mínimo apresenta uma diferença crucial em relação ao caso ótimo discutido anteriormente. Para cada comprimento adotado, observa-se um valor correspondente diferente de r_h , especialmente nos menores níveis de compensação. Essa variação implica no aumento da complexidade do problema, destacando a possível necessidade de se considerar conjuntos de equações distintas para cada comprimento, no caso da inexistência de um padrão.

Outra disparidade em relação ao caso ótimo surge ao agrupar as curvas por comprimentos, conforme mostrado na Figura 5.15. Os resultados não indicaram uma tendência clara no comportamento dos coeficientes que compõem as curvas, ou seja, o aumento do valor de r_h , bem como a inclinação da função que o descreve, dependem de uma combinação do comprimento adotado e de c_1/c_0 , dificultando a previsibilidade em relação ao deslocamento das mesmas.

Figura 5.15: r_h em relação à compensação relativa para diferentes comprimentos.





(e) $L = 400$ km

Fonte: Autoria Própria

Pode-se notar que algumas curvas possuem inclinações distintas, ao passo que outras, com relações c_1/c_0 diferentes, se sobrepõem. Por exemplo, na Figura 5.15 (c) e (d), ao observar as LTs com $c_1/c_0 = 1,71, 1,75$ e $1,87$, as curvas apresentaram resultados similares de r_h para toda a faixa de compensação; entretanto, os resultados da pesquisa não conseguiram descrever o comportamento destas curvas com os dados de entrada.

Os coeficientes para as demais curvas no cenário mínimo são apresentados na Tabela 5.9, com os quais não foram encontradas similaridades ou padrões que possibilitassem a definição de uma função para reproduzir os resultados.

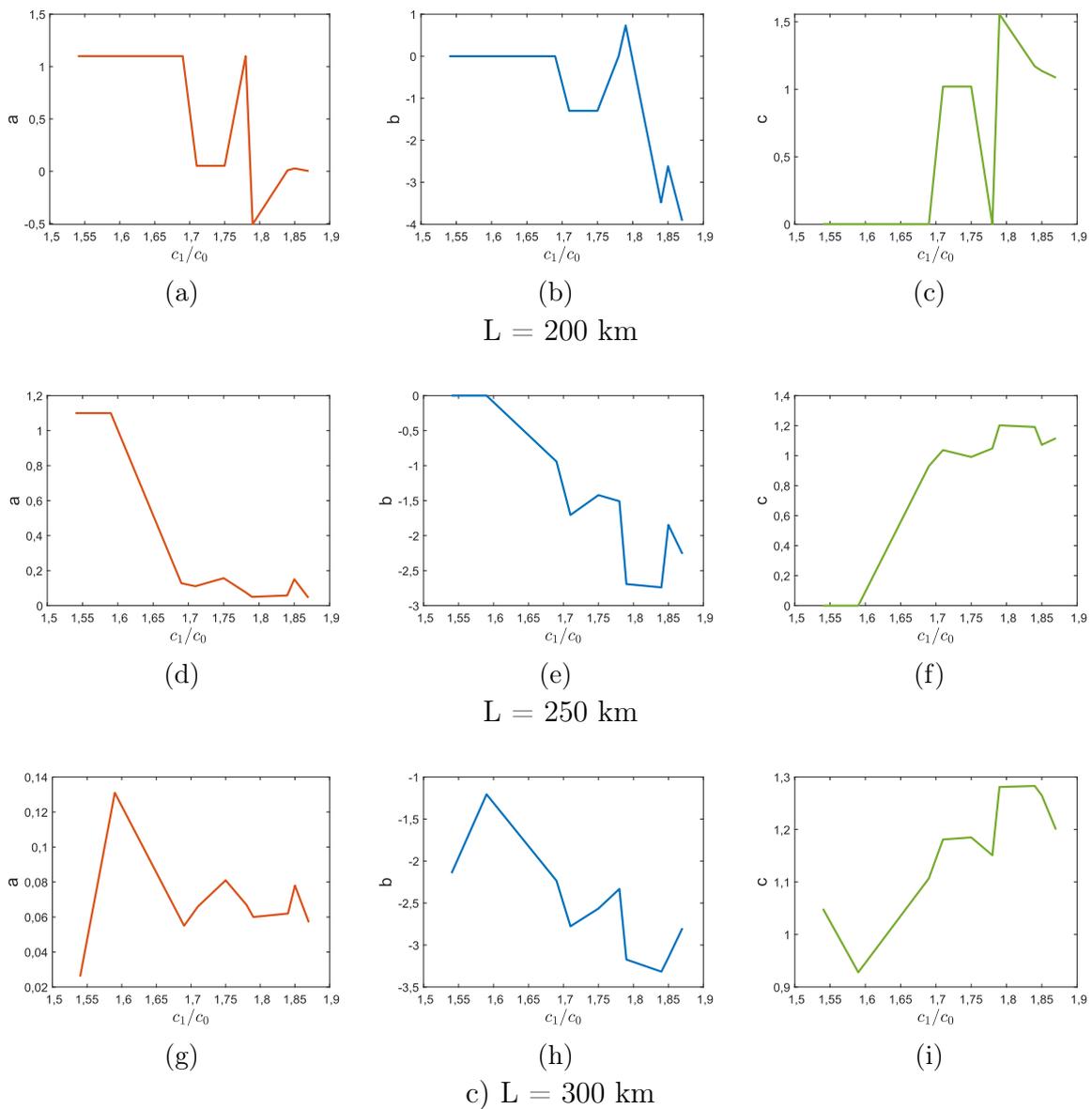
Tabela 5.9: Coeficientes a, b e c para as LTs sob estudo - cenário mínimo.

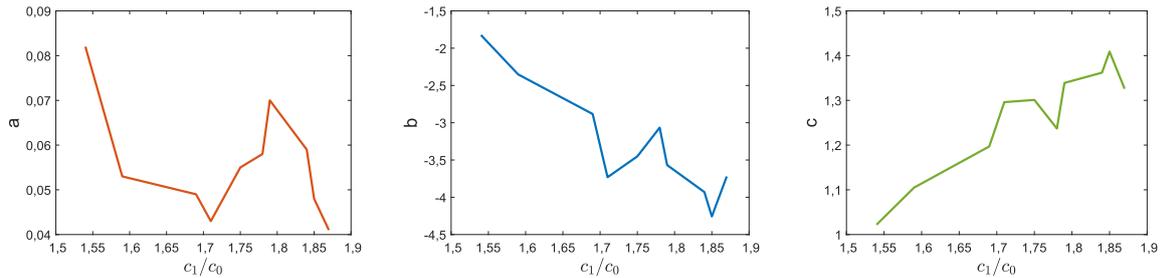
L (km)	1,54			1,59			1,69			1,71			1,75		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
200	1,100	0,000	0,000	1,100	0,000	0,000	1,100	0,000	0,000	0,053	-1,300	1,020	0,053	-1,300	1,020
250	1,100	0,000	0,000	1,100	0,000	0,000	0,128	-0,942	0,930	0,111	-1,705	1,037	0,157	-1,421	0,991
300	0,026	-2,145	1,049	0,131	-1,206	0,928	0,055	-2,235	1,107	0,066	-2,777	1,181	0,081	-2,566	1,185
350	0,082	-1,824	1,022	0,053	-2,352	1,105	0,049	-2,883	1,197	0,043	-3,731	1,296	0,055	-3,451	1,301
400	0,054	-2,566	1,111	0,031	-3,304	1,193	0,020	-4,242	1,336	0,016	-5,321	1,453	0,029	-4,616	1,448
L (km)	1,78			1,79			1,84			1,85			1,87		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
200	1,100	0,000	0,000	-0,505	0,732	1,556	0,010	-3,480	1,170	0,028	-2,618	1,136	0,003	-3,916	1,086
250	0,079	-1,508	1,048	0,050	-2,692	1,202	0,058	-2,739	1,191	0,151	-1,847	1,072	0,045	-2,260	1,116
300	0,067	-2,332	1,151	0,060	-3,173	1,281	0,062	-3,317	1,283	0,078	-3,150	1,265	0,057	-2,800	1,200
350	0,058	-3,066	1,237	0,070	-3,568	1,339	0,059	-3,930	1,362	0,048	-4,257	1,409	0,041	-3,721	1,326
400	0,019	-4,615	1,425	0,052	-4,374	1,452	0,022	-5,607	1,544	0,022	-5,771	1,558	0,016	-5,315	1,501

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 5.16 são apresentados as curvas de cada coeficiente em relação ao comprimento para o conjunto das 10 LTs. Diante dos pontos discutidos até então, ao se considerar um conjunto de M linhas de transmissão e N comprimentos, seriam geradas $M \times N$ equações, o que torna o procedimento menos prático e evidencia a necessidade de um aprofundamento visto que este é um cenário de interesse. Logo, este tópico se apresenta como uma das sugestões de melhoria e continuidade para trabalhos futuros.

Figura 5.16: Variação dos coeficientes a, b e c para as LTs - cenário mínimo.



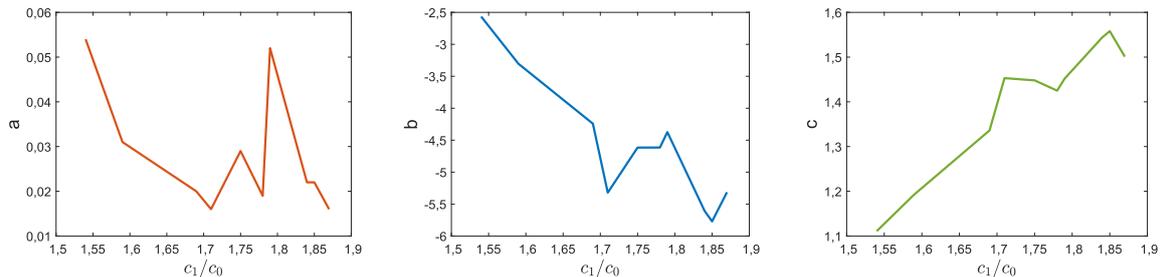


(j)

(k)

(l)

L = 350 km



(m)

(n)

(o)

L = 400 km

Fonte: Autoria Própria.

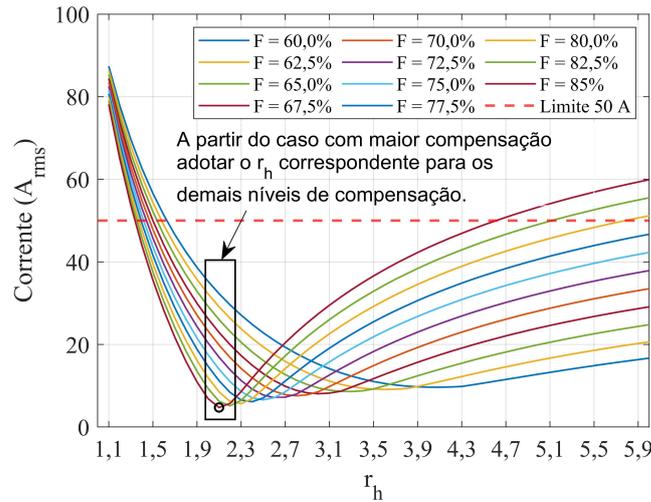
5.2.3 Cenário intermediário

Dado o contexto mencionado anteriormente, uma alternativa intermediária ao caso “ótimo” e “mínimo” para escolha de reatores de neutro é proposta.

A metodologia é apresentada na Figura 5.17 e consiste em avaliar o maior nível de compensação passível de ser adotado para a LT e encontrar o r_h correspondente ao cenário “ótimo”. Posteriormente, sugere-se tomar este valor como referência para os demais níveis de compensação inferiores, destacados pelo retângulo. Por fim, com os reatores de linha X_L , calculam-se os reatores de neutro respectivos com a equação 4.2.

Esta proposta parte da observação obtida para todas as simulações da subseção 5.1.2, nas quais notou-se que um valor de r_h fixo poderia ser utilizado entre diferentes compensações reativas, contanto que seja considerado o inerente aumento da corrente de arco secundário, desde que esta permaneça dentro dos limites normativos.

Figura 5.17: Cenário intermediário.

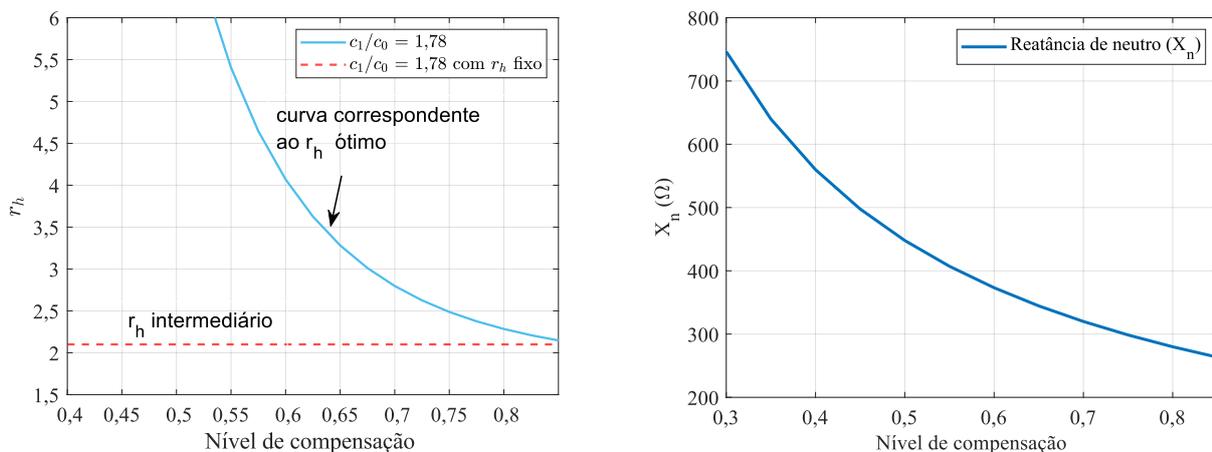


Fonte: Autoria Própria.

Para fins ilustrativos, será tomada como base a Figura 5.17, cujo valor de c_1/c_0 é igual a 1,78, com r_h “ótimo” de aproximadamente 2,1 e compensação reativa de 85%.

Na Figura 5.18 (a) é apresentada a comparação entre os valores de r_h , na qual a curva tracejada em vermelho indica um r_h constante igual a 2,1, ao passo que a curva em azul apresenta os valores de r_h considerados ótimos. A partir do valor fixo de r_h e dos respectivos reatores de linha (X_L), são obtidos os reatores de neutro (X_n) correspondentes, cujos valores são apresentados na Figura 5.18 (b).

Figura 5.18: Procedimento proposto para reator intermediário.



(a) Comparação dos valores de r_h para cenário ótimo e intermediário.

(b) Reatores de neutro obtidos com o r_h intermediário.

Fonte: Autoria Própria.

Além da simplicidade, ao precisar somente de um valor inicial de r_h , esta abordagem possui como vantagem a diminuição considerável na reatância de neutro X_n , se comparado com a forma tradicional de cálculo descrita pela equação 2.19, especialmente em níveis de compensação reativa mais baixos. Por fim, ainda é possível obter correntes inferiores ao caso mínimo, sem necessariamente precisar estimar quaisquer outras curvas. Os resultados comparativos serão abordados com maiores detalhes na seção a seguir.

5.3 RESULTADOS COMPARATIVOS

Nesta seção, será conduzida uma avaliação da eficácia das abordagens desenvolvidas neste trabalho, com o objetivo de identificar eventuais divergências e limitações nos métodos adotados. Para alcançar esse propósito, serão realizadas comparações com formulações presentes na literatura. Estas comparações abrangerão os seguintes casos:

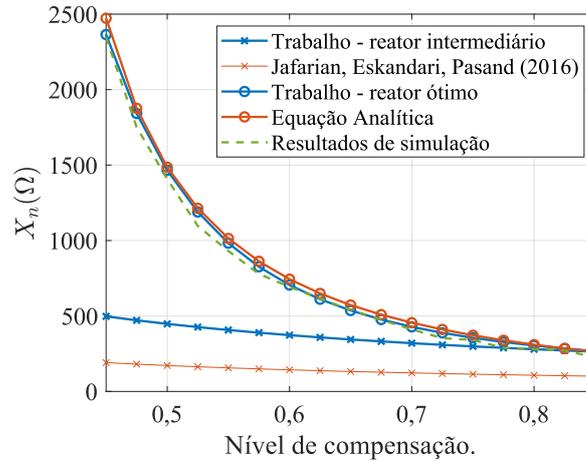
- O cenário “ótimo” será comparado com a equação analítica referente ao trabalho de Kimbark (1964), visto que ambas as abordagens visam maximizar a neutralização do acoplamento capacitivo. Além disso, também são utilizados os valores de X_n ótimos obtidos via simulações.
- O cenário intermediário deste trabalho será comparado ao trabalho apresentado em Jafarian, Eskandari e Sanaye-Pasand (2016), cuja abordagem apresenta uma equação para obtenção de um reator sub-ótimo, calculado de acordo com a equação 5.5.

$$X_n = \frac{X_L}{3} \left(\frac{c_1}{c_0} - 1 \right). \quad (5.5)$$

onde X_L representa o reator de linha, c_1 e c_0 representam as capacitâncias de sequência positiva e zero, respectivamente.

Um exemplo geral dos resultados é apresentado na Figura 5.19, onde todas as abordagens citadas são utilizadas para calcular os respectivos reatores de neutro e é possível notar quais curvas serão comparadas.

Figura 5.19: Exemplo de curvas obtidas para reatores de neutro com diferentes métodos.



Fonte: Autoria Própria.

Algumas observações se fazem necessárias para que as comparações sejam feitas de forma adequada e são listadas a seguir:

1. Para as comparações entre o cenário ótimo e Kimbark (1964), serão considerados os valores de compensação acima do limite mínimo estabelecido pela equação 5.6.

$$F_{min} = \frac{B'_1 - B'_0}{B'_1} = 1 - \frac{B'_0}{B'_1}. \tag{5.6}$$

Ao utilizar valores muito próximos ao limite, a fórmula 2.19 resulta em uma susceptância indutiva (B_n) que tende a zero, o que conseqüentemente leva a uma reatância indutiva (X_n) com valores extremamente elevados.

A tabela 5.10 apresenta os valores mínimos de compensação reativa calculados com os dados da pesquisa com a equação 5.6.

Tabela 5.10: Valores mínimos de compensação para todas as LTs.

c_1/c_0	1,54	1,59	1,69	1,71	1,75	1,78	1,79	1,84	1,85	1,87
F_{min}	35,1%	37,1%	40,8%	41,5%	42,9%	43,8%	44,1%	45,7%	45,9%	46,5%

Fonte: Autoria Própria.

2. Conforme já mencionado, para alguns cenários com valores mais baixos de compensação reativa, o mínimo global de corrente obtido nos gráficos das simulações não corresponde ao mínimo real do sistema, resultando em um valor de r_h incorreto (vide subseção 5.1.2). Logo, os reatores de neutro X_n calculados com base nestes valores de r_h também não

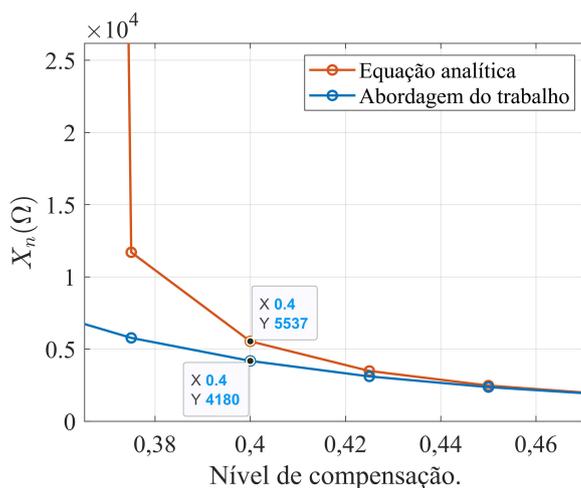
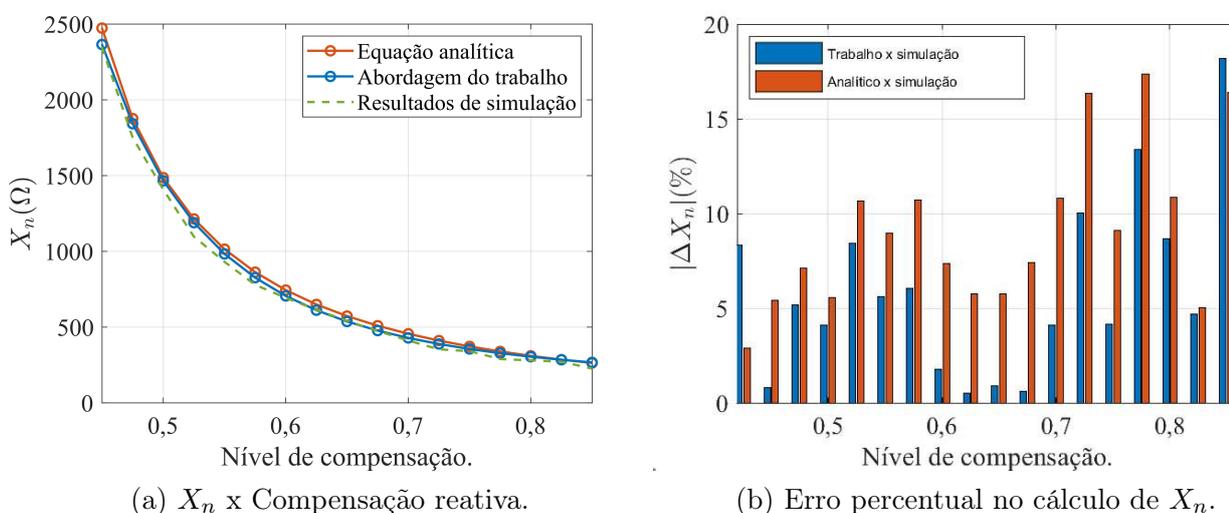
possuem significância prática, sendo estes dispensados na análise comparativa. Assim, os valores do eixo de compensação nas figuras para cada LT são considerados com base nos limites da Tabela 5.5.

3. Para os níveis de compensação cujos pontos da simulação não são representativos, a comparação se dará confrontando diretamente a reatância proveniente das equações do trabalho e formulação analítica.
4. Para fins de simplificação na representação, durante a comparação entre métodos, as formas de onda das tensões de restabelecimento transitórias (TRT) serão omitidas, salvo em casos onde ocorra alguma violação à curva indicativa.
5. As comparações para os reatores intermediários e sub-ótimo foram realizadas com todas as LTs e variações de comprimento presentes na pesquisa, entretanto, somente alguns resultados relevantes serão explicitados para exemplificar os comportamentos observados entre as duas propostas.

5.3.1 Avaliação dos resultados - Reator ótimo

Os reatores de neutro obtidos para o comprimento de 400 km com relação $c_1/c_0 = 1,54$ são apresentados na Figura 5.20 (a), onde os erros percentuais relacionados a cada uma das abordagens são explicitados na 5.20 (b), bem como um cenário próximo ao limite inferior de compensação é mostrado na 5.20 (c).

Figura 5.20: Comparação dos valores de reatores de neutro para $c_1/c_0 = 1,54$ e 400 km de comprimento.



Autoria Própria.

Ao observar o cenário ótimo e analítico, ambas as curvas apresentaram valores ligeiramente acima da referência de simulação, com a maior discrepância identificada quando empregada a

equação proposta neste estudo, correspondendo a 18,17% com 85% de compensação. Em relação à equação analítica, a maior diferença percentual foi de 17,35%, para 77,5% de compensação.

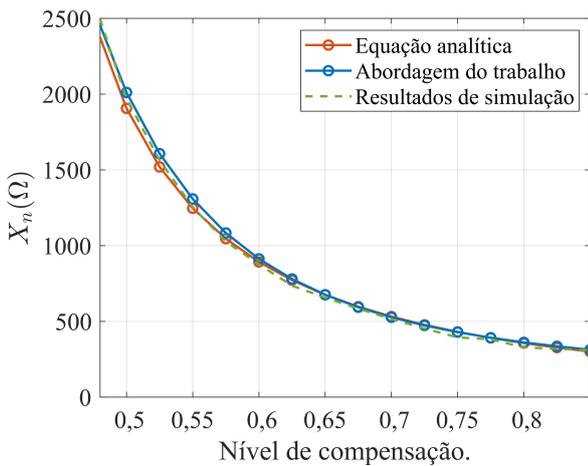
Ao confrontar diretamente as equações para 40% de compensação, valor este acima do limite da Tabela 5.10 e no qual não existe a referência de simulação, foi obtida uma redução de 25% no valor do reator de neutro, correspondente a uma diferença de cerca de 1350 Ω.

O comportamento próximo do valor mínimo apresentado pela equação 5.6 ocorreu para os demais casos estudados na pesquisa e se justifica devido ao fato de que ao aproximar deste nível de compensação reativa, o valor da susceptância capacitiva $B_g = (B'_0 - (1 - F)B'_1)$ sofre uma drástica redução, tendendo para zero. Dessa forma, o termo do numerador do cálculo da equação 2.19 também tende para zero, ocasionando uma susceptância indutiva de neutro quase nula e, conseqüentemente, a reatância de neutro X_n tende para valores elevados e impraticáveis, devido à relação apresentada na equação 5.7.

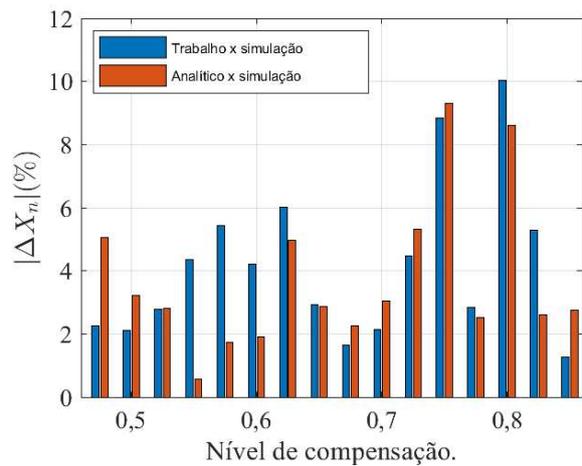
$$X_n = 1/B_n. \tag{5.7}$$

Para as LTs com $c_1/c_0 = 1,59$ e $1,69$, apresentadas na Figura 5.21, os maiores erros foram de aproximadamente 11%. No primeiro caso, a maior divergência ocorreu com $F = 80\%$, enquanto na segunda LT esses valores ocorreram para $F = 55\%$ e $F = 62,5\%$.

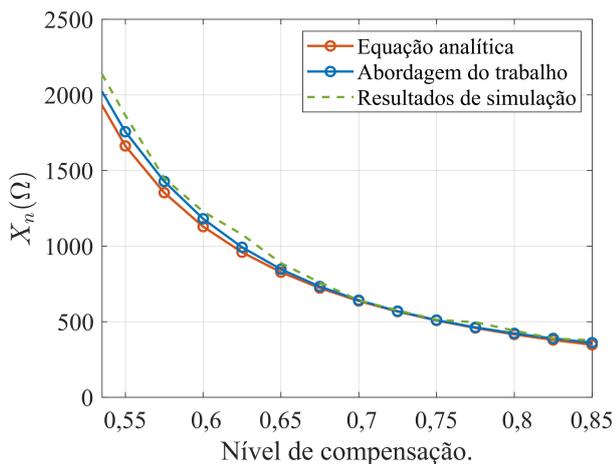
Figura 5.21: Comparação de X_n para $c_1/c_0 = 1,59$ e $c_1/c_0 = 1,69$ - 400 km de comprimento.



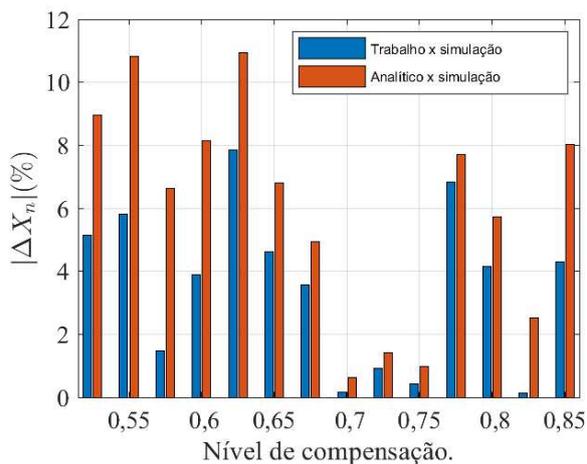
(a) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,59$.



(b) Erro percentual no cálculo de X_n .



(c) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,69$.

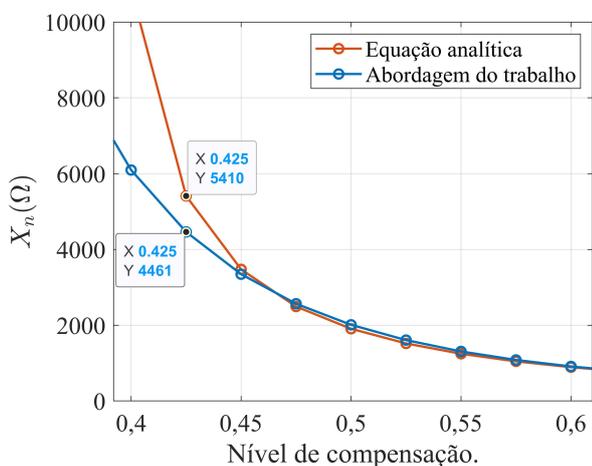


(d) Erro percentual no cálculo de X_n .

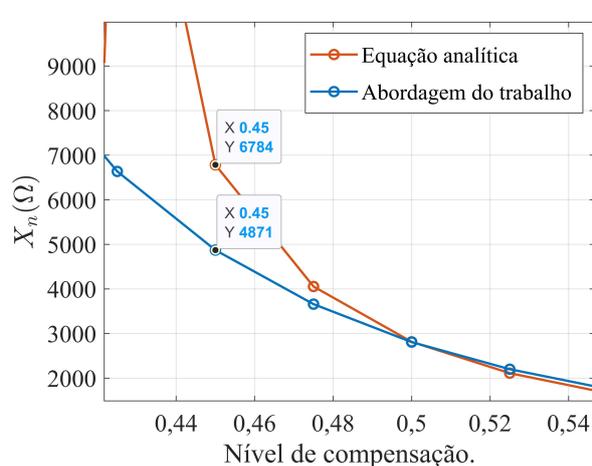
Fonte: Autoria Própria.

Com a comparação entre as duas equações para os níveis de compensação de 42,5% e 45%, respectivamente, as equações do trabalho obtiveram reduções de 21% e 39% no valor do reator X_n resultante, em relação à equação analítica. Este resultado é mostrado na Figura 5.22.

Figura 5.22: Comparação entre as duas equações para 400 km de comprimento.



(a) $c_1/c_0 = 1,59$ - Compensação de 42,5%.

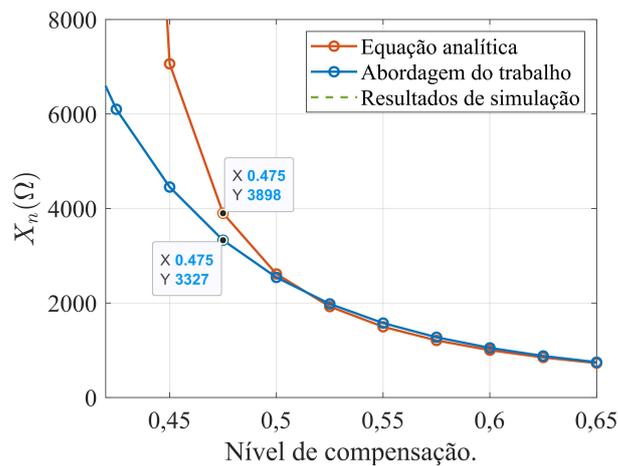
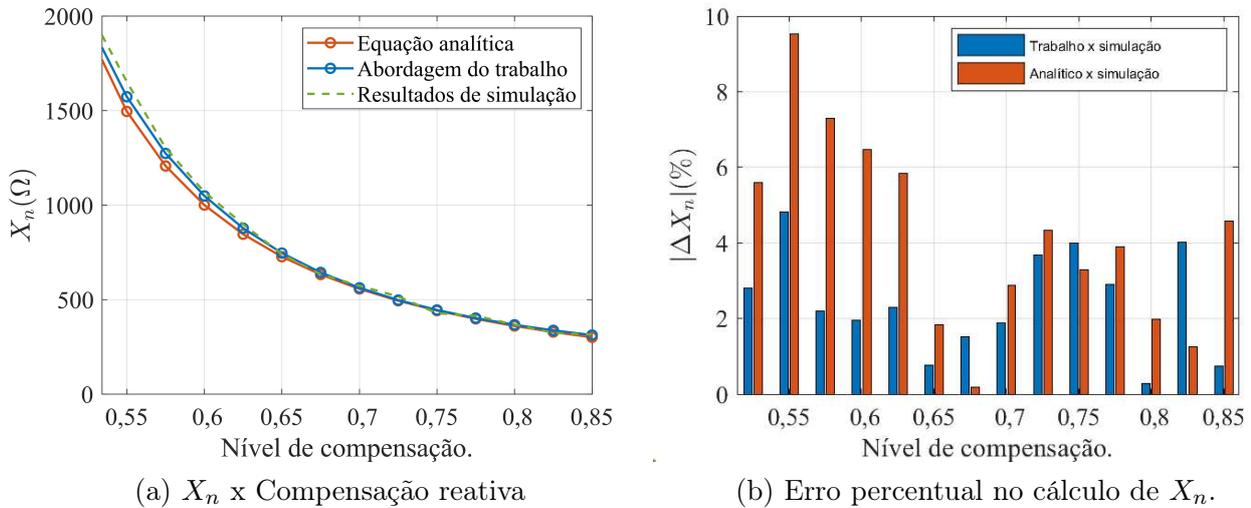


(b) $c_1/c_0 = 1,69$ - Compensação de 45%.

Fonte: Autoria Própria.

A seguir, na Figura 5.23 são apresentados os resultados obtidos para a LT com relação $c_1/c_0 = 1,71$. Na faixa de compensação avaliada, o maior desvio registrado correspondeu a 9,5% para 55% de compensação.

Figura 5.23: Comparação de X_n para $c_1/c_0 = 1,71 - 400$ km de comprimento.

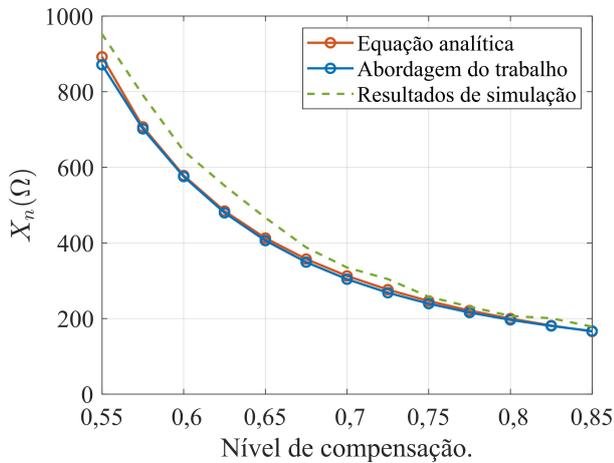


Fonte: Autoria Própria.

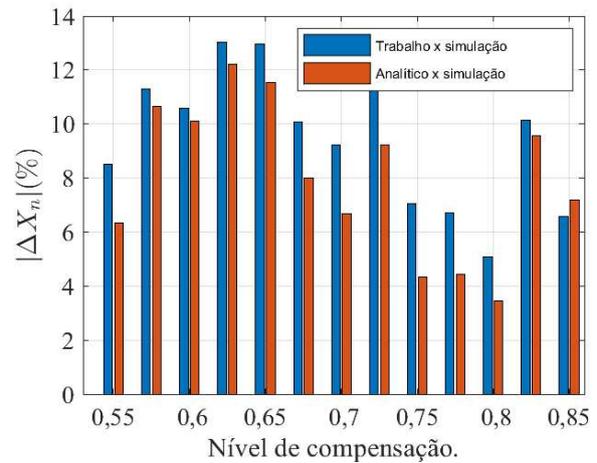
Ao comparar diretamente os resultados das duas equações para $F = 47,5\%$, sendo este um valor acima do limite na Tabela 5.10, é possível observar uma discrepância no valor do reator resultante, conforme mostrado na Figura 5.23 (c). A formulação analítica fornece uma reatância de 3898Ω , enquanto a equação do trabalho indica 3327Ω para o cenário ótimo.

Ao analisar as LTs com $c_1/c_0 = 1,75$ e $1,78$, presentes na Figura 5.24, verifica-se que as maiores divergências para níveis de compensação entre 55% e 75% , sendo o maior desvio encontrado de cerca de 13% no valor do reator para o primeiro caso e 12% , para o segundo. Para a comparação direta, foi obtida uma redução de 31% e 18% no valor do reator X_n resultante, para $47,5\%$ e 50% de compensação, respectivamente.

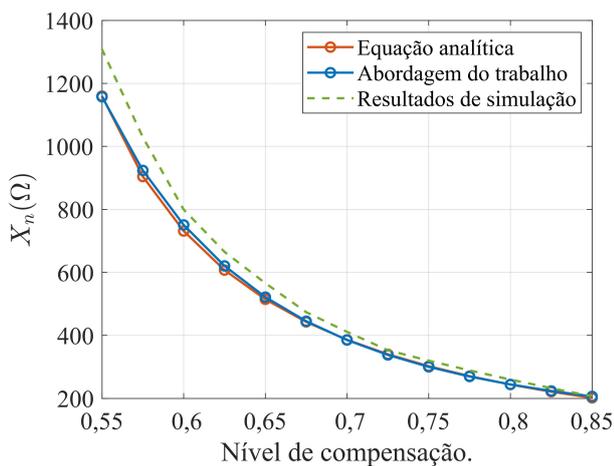
Figura 5.24: Comparação de X_n para $c_1/c_0 = 1,75$ e $c_1/c_0 = 1,78$ - 400 km de comprimento.



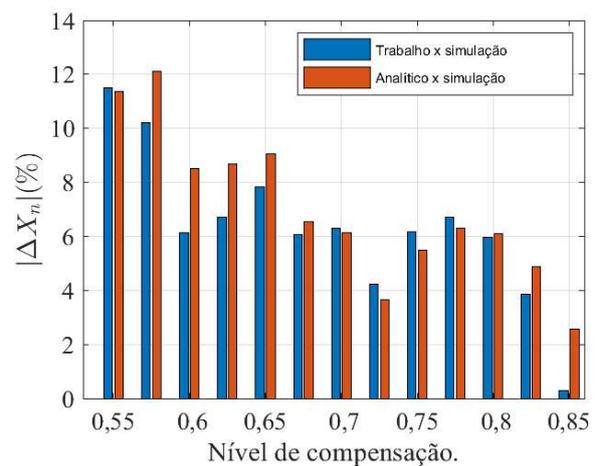
(a) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,75$.



(b) Erro percentual no cálculo de X_n .



(c) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,78$.



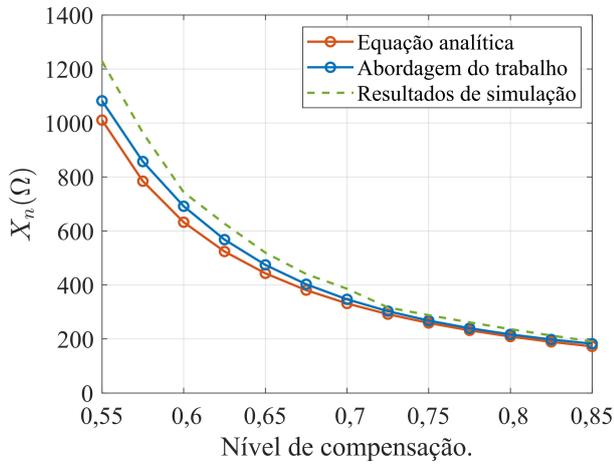
(d) Erro percentual no cálculo de X_n .

Autoria Própria.

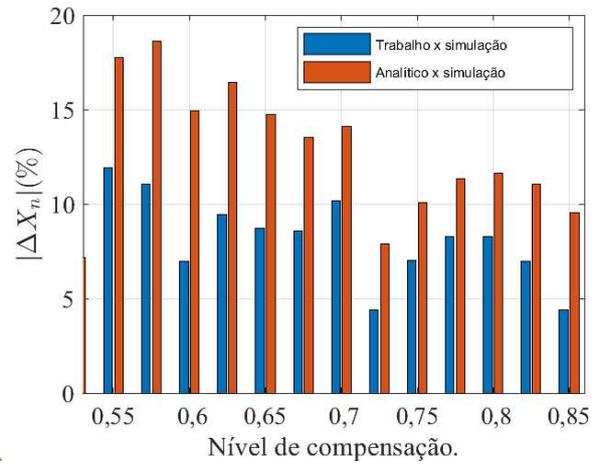
Na Figura 5.25, são apresentados os valores dos reatores X_n e os erros percentuais para diferentes linhas, com c_1/c_0 variando entre 1,79, 1,84, 1,85 e 1,87, respectivamente.

Para a Figura 5.25 (a), observa-se o maior desvio ocorrendo para compensação de 57,5%, correspondendo a 18,6%. Já na Figura 5.25 (c), a partir de 70% de compensação, ambas as equações apresentaram erros menores que 6%, sendo o maior pico registrado com valor de cerca de 10% com a compensação de 57,5%. A Figura 5.25 e) exibe melhores resultados de aproximação em relação às equações do trabalho, com desvios menores que 5% para toda a faixa avaliada, considerando $c_1/c_0 = 1,85$. Por fim, para $c_1/c_0 = 1,87$, presente na 5.25 (g), os maiores desvios corresponderam a aproximadamente 15% para compensação referente à 62,5%.

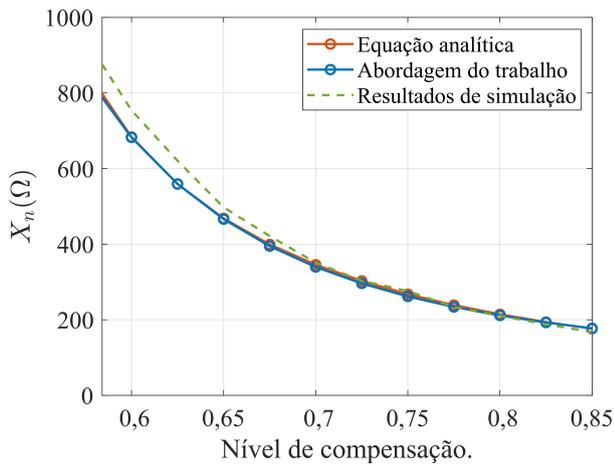
Figura 5.25: Comparação de X_n para para diferentes linhas de transmissão - 400 km de comprimento.



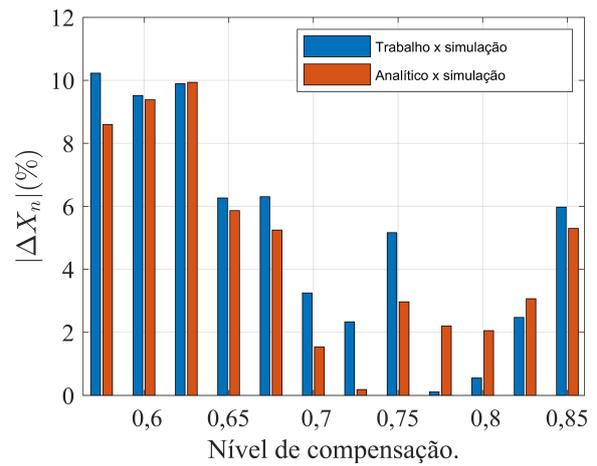
(a) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,79$.



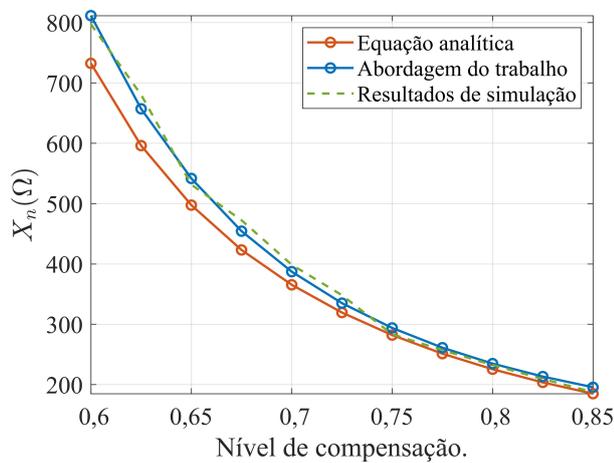
(b) Erro percentual no cálculo de X_n .



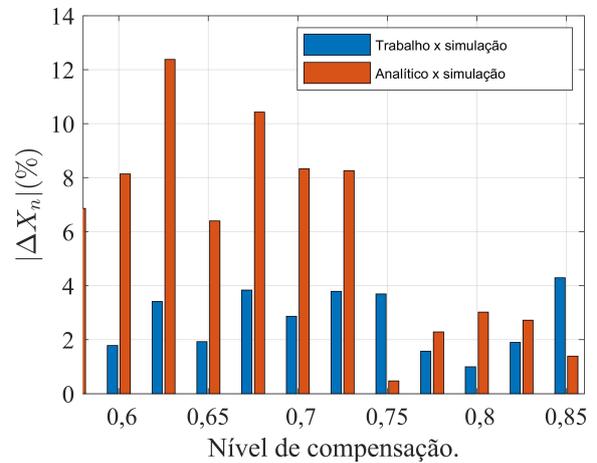
(c) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,84$.



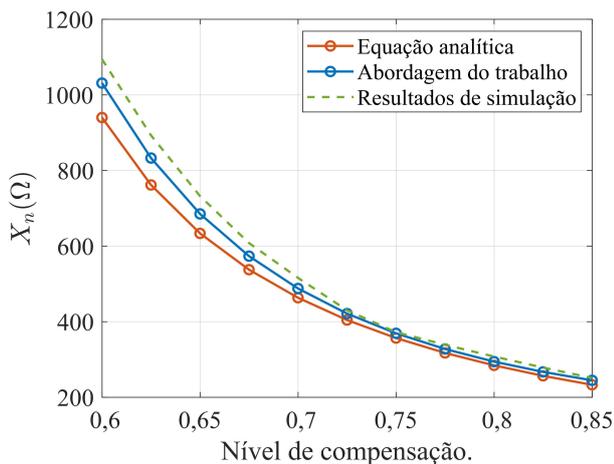
(d) Erro percentual no cálculo de X_n .



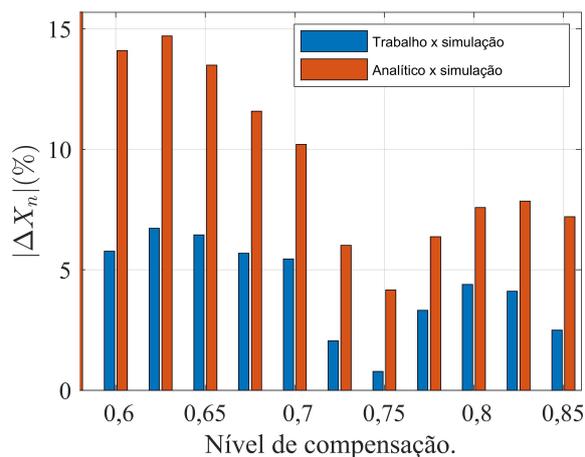
(e) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,85$.



(f) Erro percentual no cálculo de X_n .



(g) X_n x Compensação reativa - $c_1/c_0 = 1,87$.



(h) Erro percentual no cálculo de X_n .

Fonte: Autoria Própria.

De forma geral, os valores de X_n obtidos para o método de Kimbark (1964) e para o cenário “ótimo” se mantiveram bastante próximos para as LTs utilizadas, o que indica que a aproximação proposta neste trabalho consegue obter resultados condizentes com a teoria para níveis de compensação acima dos limites obtidos com a equação 5.6.

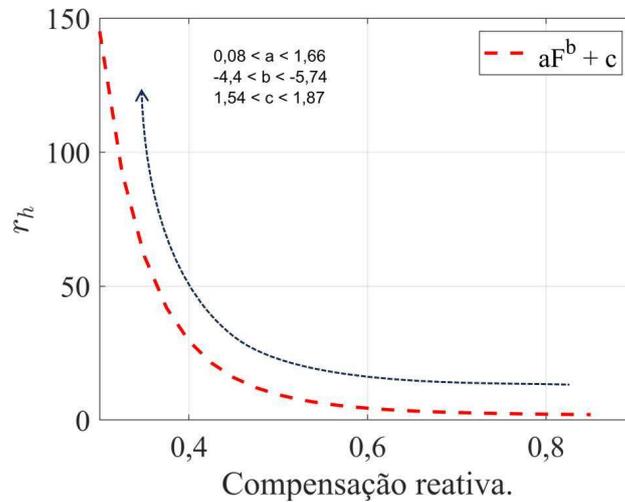
É importante salientar que os desvios apresentados em alguns dos gráficos não devem ser automaticamente interpretados como escolhas inadequadas para os reatores, pois a diferença notada na maioria dos casos foi reduzida. Dado que a equação foi derivada a partir dos menores valores de corrente avaliados, naturalmente, existe a possibilidade de modificação no valor da reatância com uma certa margem de flexibilidade, ao contrário do apresentado para o cenário mínimo, por exemplo, no qual o reator obtido foi o primeiro imediatamente abaixo do limiar.

Apesar dos resultados apresentarem valores de reatores na faixa de compensação majoritariamente próximos, ao utilizar a equação proposta neste trabalho para níveis de compensação inferiores a esse limite, também são obtidos valores de reatâncias extremamente elevadas, o que possivelmente inviabiliza sua aplicação a depender do nível de compensação escolhido.

Este comportamento, ilustrado na Figura 5.26, se dá pelo formato da equação de potência de dois termos adotada (equação 4.4), que apresenta sensibilidade a pequenas variações na compensação quando esta se aproxima do limite mínimo. Dado que o coeficiente a é não nulo e o coeficiente b tem valor negativo, à medida que F diminui, o termo F^b se torna cada vez maior, levando a um aumento drástico no valor de r_h que, por sua vez, possui relação direta

com a reatância do reator de neutro, destacado pela equação 5.8.

Figura 5.26: Exemplo do crescimento da curva com a equação de potência adotada.



Fonte: Autoria Própria.

$$X_n = \frac{r_h X_L - X_L}{3} = X_L \frac{(r_h - 1)}{3}. \quad (5.8)$$

Portanto, embora a equação deste trabalho permita a obtenção de valores menores de reatância para uma faixa ligeiramente maior de níveis de compensação do que a equação analítica, ainda sim é evidente a necessidade da realização de uma análise de viabilidade na aplicação do reator calculado. Essa análise deve abordar aspectos como correntes eficazes, tensões de pico e ressonância resultantes, além de considerações sobre o nível de isolamento necessário.

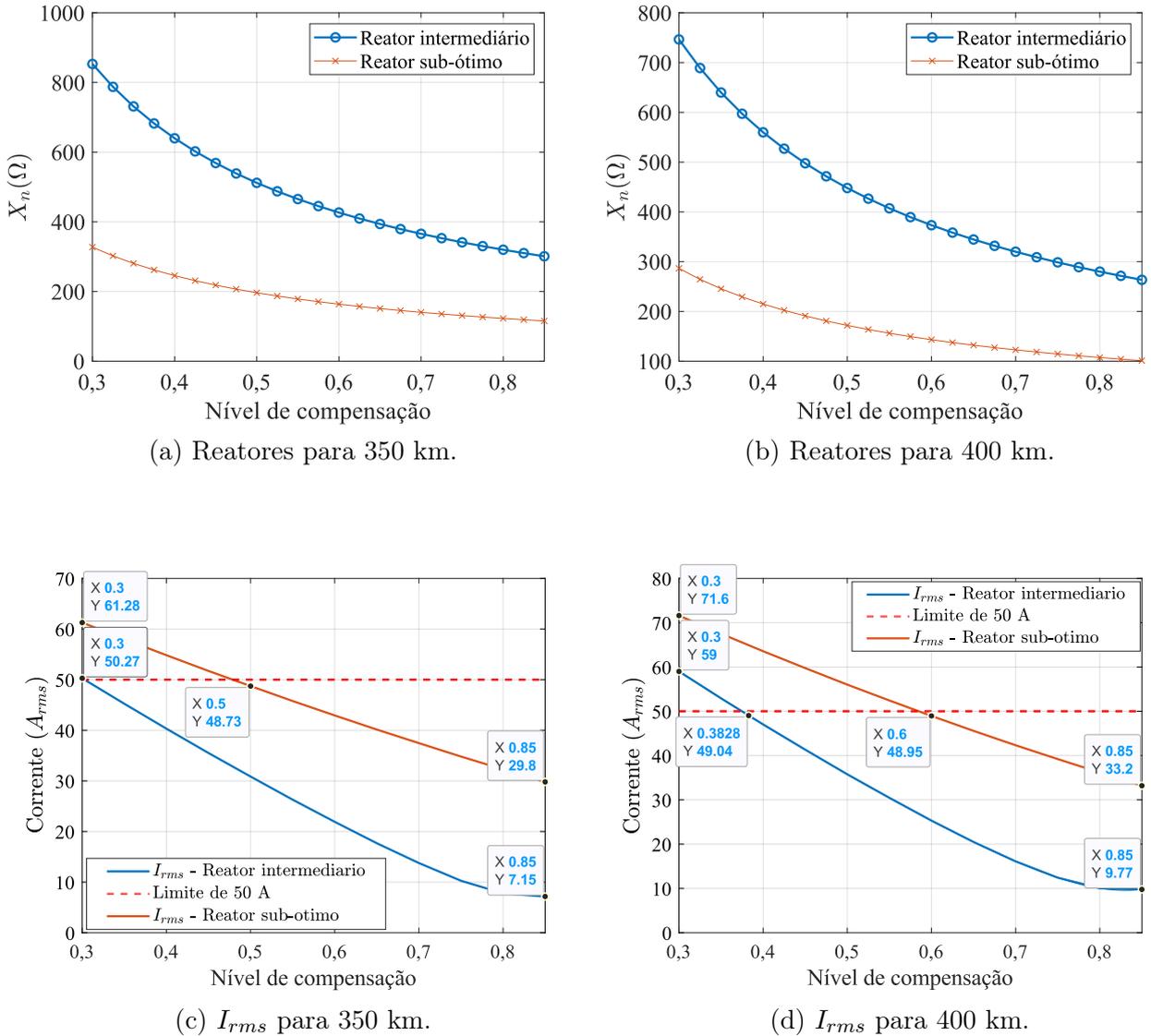
Os erros percentuais para os demais comprimentos adotados encontram-se compilados nas Tabelas do Anexo B e não foram explicitamente discutidos por constituírem cenários com correntes menores, devido à extensão inferior das LTs. Para cada tabela, foi adicionado um destaque em amarelo correspondente aos maiores desvios por nível de compensação.

5.3.2 Avaliação dos resultados - Reator intermediário

Na Figura 5.27 são apresentados os resultados das correntes eficazes obtidas a partir da aplicação dos reatores calculados com o método intermediário e pelo método sub-ótimo de Jafarian, Eskandari e Sanaye-Pasand (2016) para a LT com $c_1/c_0 = 1,54$. As marcações adicionadas aos

gráficos indicam os valores de corrente para os extremos das compensações avaliadas, além do grau de compensação mínimo necessário para manter as correntes inferiores a 50 A.

Figura 5.27: Comparação para os reatores intermediários e sub-ótimos - $c_1/c_0 = 1,54$.

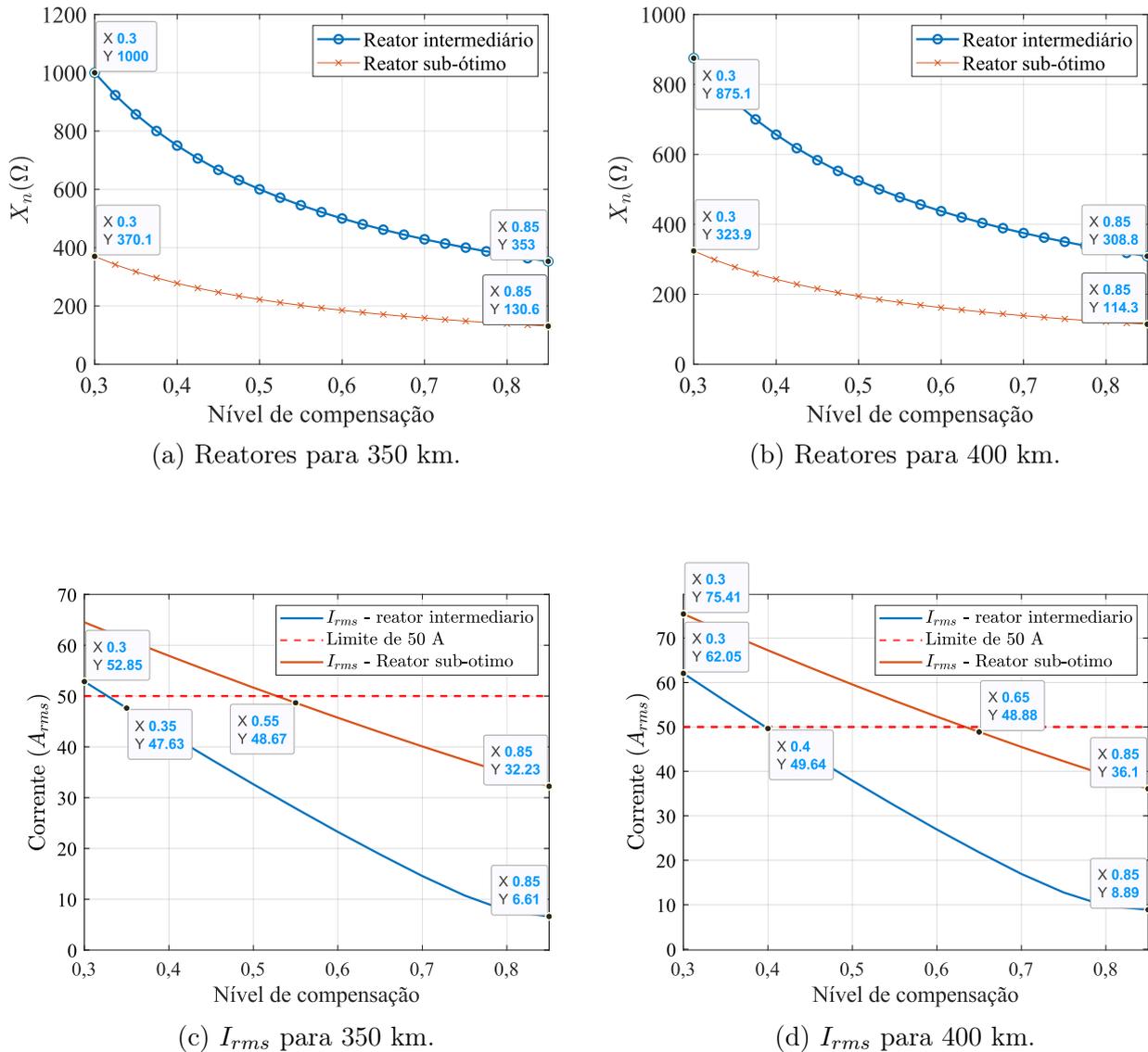


Fonte: Autoria Própria.

O método intermediário proposto não apresentou restrições em relação ao nível de compensação para comprimentos inferiores à 350 km, mantendo as correntes abaixo de 50 A. Na Figura 5.27 (c), a corrente máxima observada para o reator intermediário se deu para 30% de compensação, ao passo que seria necessário aproximadamente 50% de compensação no caso sub-ótimo. Para 400 km, presente na Figura 5.27 (d), o reator intermediário é aplicável para uma faixa de compensação a partir de 38%, sendo necessário ao menos 60% para o uso com o reator sub-ótimo.

Na Figura 5.28 são apresentados os resultados para a LT com razão $c_1/c_0 = 1,59$. Nas Figuras 5.28 (a) e (b), os reatores de neutro calculados por ambas as abordagens são explicitados.

Figura 5.28: Comparação para os reatores intermediários e sub-ótimos - $c_1/c_0 = 1,59$.



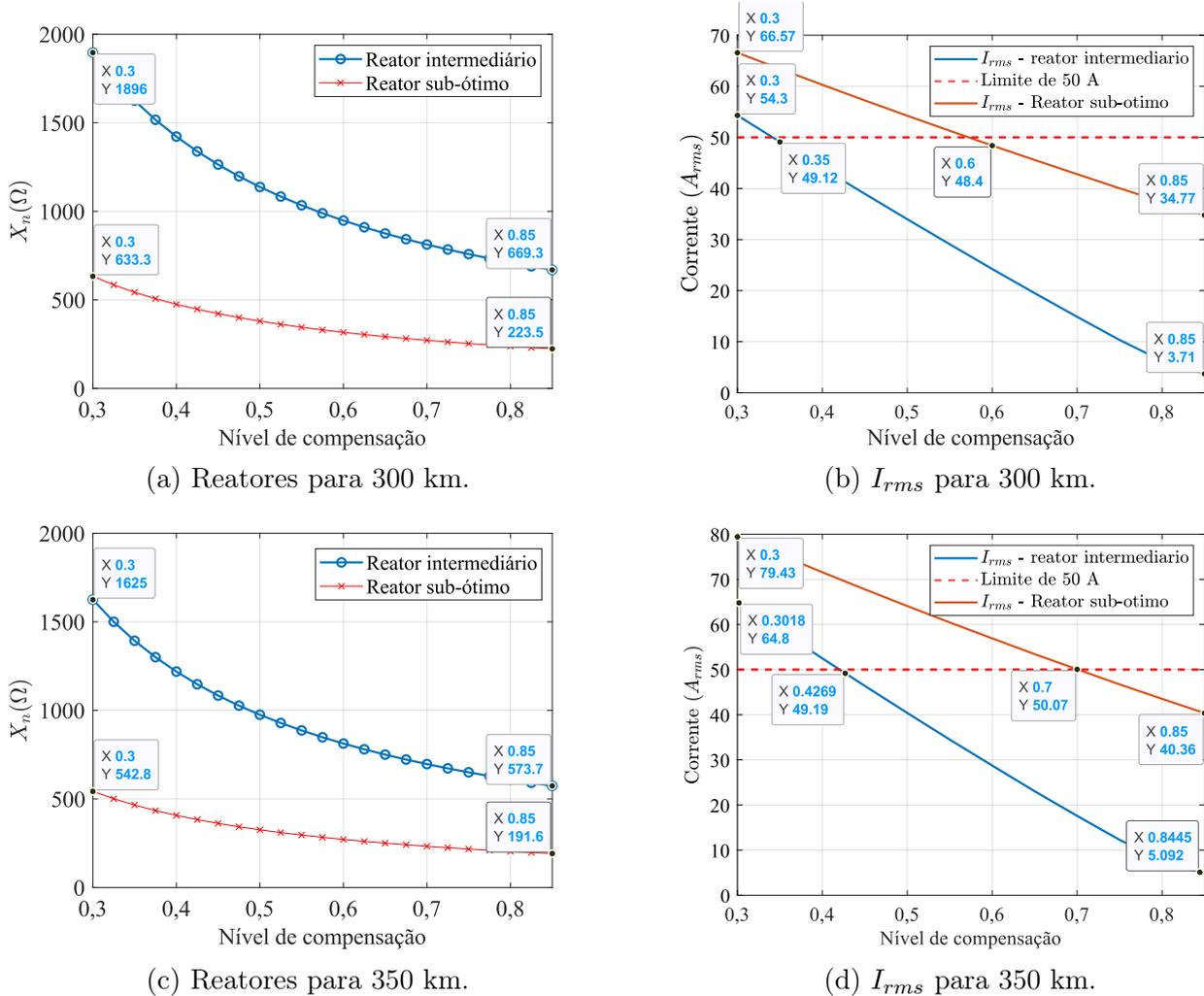
Fonte: Autoria Própria.

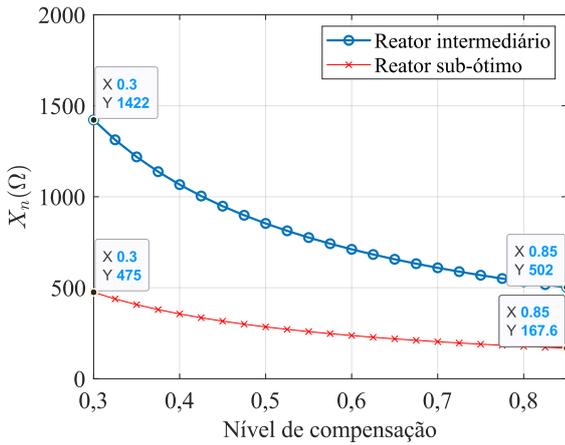
De forma similar ao cenário com $c_1/c_0 = 1,54$, a adoção do reator sub-ótimo, apesar de possuir um valor de fato reduzido, possui impacto direto na faixa de compensação para a qual o método pode ser aplicado. Ao analisar a Figura 5.28 (c), com comprimento de 350 km, uma compensação abaixo de 55% faria com que o limite de corrente fosse ultrapassado para o reator sub-ótimo, ao passo que o reator intermediário apresentou esta limitação somente para compensações inferiores a 35%. Para 400 km, os limites mínimos observados foram de 40% e 65%, respectivamente. Para os testes realizados com os comprimentos abaixo de 350 km, não

foram observados outros pontos de não conformidade com o critério de corrente para o reator intermediário para esta linha de transmissão.

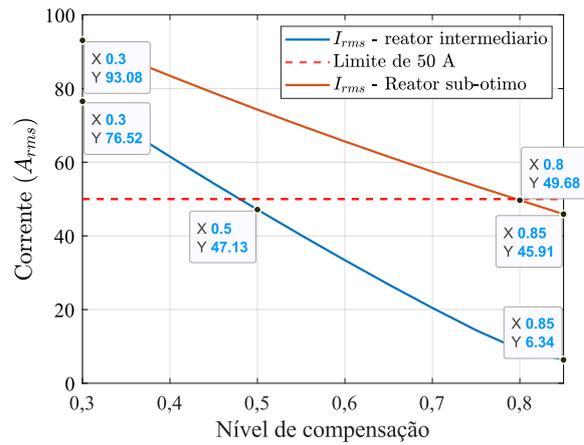
Na Figura 5.29 apresentam-se os resultados para a LT com razão c_1/c_0 igual a 1,87. Nas Figuras 5.29 (a), (c) e (e) são apresentados os reatores de neutro para os comprimentos de 300, 350 e 400 km, respectivamente. Nas Figuras 5.29 (b), (d) e (f) mostram-se as correntes de arco secundário resultantes.

Figura 5.29: Comparação para os reatores intermediários e sub-ótimos - $c_1/c_0 = 1,87$.





(e) Reatores para 400 km.



(f) I_{rms} para 400 km.

Fonte: Autoria Própria.

Para comprimentos de 300 km, a metodologia proposta com o uso de um reator intermediário demonstra sua viabilidade com uma compensação a partir de 35%. No entanto, no cenário sub-ótimo, a compensação necessária é significativamente mais alta, atingindo pelo menos 60%. É importante notar que essa diferença resulta em uma redução acentuada na corrente eficaz do sistema, especialmente em níveis de compensação mais elevados. Por exemplo, com uma compensação de 85%, a corrente é de apenas 3,71 A com a metodologia proposta, enquanto no cenário sub-ótimo, a corrente é muito maior, excedendo 30 A.

Quando se consideram distâncias de 350 km e 400 km, fica evidente que a metodologia proposta com o reator sub-ótimo tem uma faixa de aplicação restrita, exigindo compensações acima de 70% e 80%, respectivamente. Em contrapartida, ao utilizar o reator intermediário nos mesmos cenários, as limitações ocorrem em níveis de compensação mais baixos, de 42% e 47%, respectivamente.

De forma geral, quando comparada com o reator sub-ótimo, o reator intermediário apresenta como principal vantagem a viabilidade de operação em uma faixa de compensações maior para cada comprimento da LT, não elevando excessivamente os valores de reatores de neutro. Esta discrepância fica particularmente evidente ao comparar com Kimbark (1964) e com as equações referentes ao reator “ótimo”, cujas implicações para níveis menores de compensação já foram discutidas previamente.

Apesar de o método com o cenário intermediário apresentar bons indicativos para escolha

dos reatores, são necessários estudos complementares com base nesta metodologia para avaliar se tais valores não ocasionam ressonâncias e assegurar que os picos de TRT estejam dentro dos limites indicados pelas normas.

5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados e analisados os resultados obtidos. Inicialmente, uma minuciosa avaliação dos aspectos gerais relacionados às variações de comprimento e níveis de compensação foi realizada, observando-se características comuns em todas as linhas de transmissão sob estudo.

Os resultados para o reator considerado ótimo foram apresentados e discutidos, resultando em um conjunto de equações que permitiam a determinação dos reatores de neutro para linhas de transmissão com diferentes relações entre as capacitâncias (c_1 e c_0). Esses resultados foram comparados com a abordagem tradicional de obtenção dos reatores de neutro.

Posteriormente, as implicações e limitações para a obtenção de uma simplificação nas equações para o reator considerado mínimo foram discutidas.

Por fim, a proposta para a obtenção do reator intermediário, situado entre o reator ótimo e mínimo, foi apresentada, destacando as vantagens em termos de aplicabilidade em comparação com uma outra metodologia presente na literatura.

No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões do presente trabalho, bem como algumas sugestões para continuidade da pesquisa.

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia para melhorar o processo de escolha de reatores de neutro para linhas de transmissão, a partir de uma análise da influência dos parâmetros na determinação do fator r_h , que relaciona as reatâncias de sequência positiva (X_1) e zero (X_0). Esses reatores desempenham um papel fundamental na mitigação da corrente de arco secundário, neutralizando parcialmente o acoplamento capacitivo mútuo entre as fases e permitindo a aplicação da técnica de religamento monopolar de forma eficaz.

A obtenção dos resultados baseou-se em simulações computacionais realizadas em sistemas modelados com o uso do programa ATP (*Alternative Transients Program*). Foram consideradas 10 linhas de transmissão, com faltas monofásicas aplicadas em ambos terminais para coletar dados das correntes eficazes e tensões. Os dados foram empregados para a geração de curvas discretas, utilizadas para avaliar padrões em diferentes comprimentos e níveis de compensação.

Com base na observação do comportamento ditado pela influência de cada parâmetro variado, foi possível a obtenção de uma equação para representar o fator r_h em função do grau de compensação reativa, a partir da aplicação de um procedimento de ajuste de curvas. Essa abordagem considerou dois cenários específicos denominados “mínimo” e “ótimo”. O cenário “mínimo” refere-se aos pontos coletados correspondentes ao primeiro reator encontrado com corrente abaixo de 50 A, enquanto o cenário “ótimo” diz respeito aos reatores com correntes eficazes e tensões globais mínimas.

Na análise das variações no comprimento da linha, foi constatado um impacto significativo sobre o valor do reator de neutro, visto que uma maior relação r_h mostrou-se necessária para manter a corrente de arco secundário reduzida. O efeito se dá principalmente devido ao fato do acoplamento capacitivo mútuo ser diretamente proporcional à extensão da LT, o que invariavelmente aumenta a corrente de curto-circuito na fase aberta. Além disso, o reator de linha X_L calculado é obtido com um valor menor. Logo, a reatância X_n também sofre uma redução,

compensando uma parcela menor do acoplamento capacitivo e ocasionando correntes de curto circuito mais elevadas.

Isso implica dizer que, a depender do nível de compensação requerido para o controle de tensão da LT, o sistema pode ser levado a uma condição na qual não se pode garantir que o método de religamento monofásico terá sucesso. Nessas circunstâncias, pode-se investigar a possibilidade de adoção do segundo critério presente nos Procedimentos de Rede, tendo em vista a implicação no aumento do tempo morto. Caso existam restrições de tempo morto a serem cumpridas, pode-se avaliar a aplicação de outros métodos, como chaves de aterramento rápido ou reatores chaveados. Nas LTs presentes neste trabalho, este efeito foi majoritariamente notado para comprimento superior a 350 km e níveis de compensação reativa até 40%.

Ao analisar a variação da compensação reativa da LT, por sua vez, foi observada uma relação inversamente proporcional com os reatores de neutro resultantes, além de uma alteração no valor do primeiro pico de TRT. No intervalo avaliado, os reatores de fase X_L apresentaram uma redução no valor da reatância de cerca de 2,8 vezes, ao se comparar as compensações de 85% e 30% para todas as linhas de transmissão, mantendo-se o comprimento constante. Foi notado que o valor da razão r_h considerada "ótima" aumenta à medida que a compensação total é reduzida, sendo este efeito mais notório nas linhas de transmissão com uma razão c_1/c_0 maior. Nestes casos, a reatância X_n correspondente apresentará uma variação significativa ao se diminuir o nível de compensação da LT, podendo inclusive chegar ao ponto de não ser viável a adoção de um reator de neutro.

Os resultados obtidos para o cenário "ótimo" mostram que o comprimento possui influência pouco significativa na razão r_h , permitindo assim a utilização de uma única equação no cálculo de reatores de neutro para diferentes extensões. Apesar da relação r_h poder ser generalizada, tal fato não implica que o reator de neutro será igual, dado que existe uma alteração do reator de linha correspondente.

Para os reatores calculados com as equações obtidas, não foram observadas ressonâncias dentro da faixa de operação de 56 - 66 Hz e majoritariamente a corrente eficaz obtida ficou abaixo dos limites.

As equações foram confrontadas com uma abordagem presente na literatura, produzindo resultados coerentes dentro da faixa de compensação considerada. Além disso, quando se trata

de níveis de compensação próximos ao limite mínimo, vale destacar que os valores derivados da equação proposta neste estudo indicam reduções no valor da reatância resultante.

No entanto, para níveis de compensação abaixo desse limite, também é observado um aumento considerável na reatância e este aumento é acentuado ao reduzir o comprimento da LT. Logo, nos cenários nos quais o valor obtido pela equação não seja praticável ou se justifique financeiramente, recomenda-se que o valor de r_h correspondente ao caso ótimo seja considerado somente como ponto de partida para os estudos, devendo-se avaliar reatores com razão r_h menores que estejam dentro do intervalo entre o cenário “ótimo” e “mínimo”.

Para o cenário considerado “mínimo”, percebeu-se a existência de variação no valor de r_h para diferentes comprimentos, sendo essa modificação mais evidente para os menores níveis de compensação reativa. Os coeficientes obtidos das equações não proporcionaram uma conclusão sobre a existência de um padrão consistente entre diversas linhas, o que indicaria a necessidade de se avaliar individualmente cada cenário para determinação do reator. Esse resultado enfatiza a importância de aprofundar as condições para a obtenção do reator mínimo, principalmente com o fato do aumento abrupto no valor de reatância “ótima” para níveis de compensação e comprimentos menores, e sugere uma rota promissora para futuras pesquisas na área.

Uma estratégia intermediária foi proposta, ao encontrar um meio-termo entre o cenário ótimo e o cenário mínimo. Essa estratégia implica em determinar o nível máximo necessário de compensação reativa para a linha de transmissão e, a partir disso, utilizar o valor correspondente de r_h como referência para níveis de compensação mais baixos. A vantagem dessa simplificação seria obter correntes inferiores às do caso mínimo, evitando a necessidade de modelar curvas individuais para diversos níveis de compensação.

A metodologia foi confrontada com uma abordagem presente na literatura e, apesar de ainda serem obtidos valores de reatâncias de neutro superiores, percebeu-se um considerável aumento na faixa de compensação para a qual o método funcionaria dentro dos limites de corrente, além de reduções na corrente de arco secundário, para o conjunto de LTs avaliadas na pesquisa. Contudo, ressalta-se que é crucial conduzir testes detalhados para assegurar que a TRT esteja em conformidade com os limites operacionais e que não existam ressonâncias.

Por fim, claramente o estudo do fenômeno de arco secundário sob o ponto de vista das recomendações normativas brasileiras pressupõe algumas simplificações, e isto decorre da alta

complexidade em se obter um modelo abrangente de arco elétrico, devido às inúmeras características que compõem o comportamento do mesmo e acabam sendo específicas do sistema sob estudo. Apesar de serem baseados em curvas experimentais, obtidas a mais de quatro décadas, assume-se que tais resultados representam uma boa amostragem do comportamento para diferentes sistemas. Portanto, justifica-se a adoção de um esquema mais simples de aplicação da falta, tendo em mente a necessidade de considerar que há um certo grau de incerteza nos resultados.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a pesquisa, são sugeridos alguns trabalhos, a fim de aprofundar a análise de sensibilidade realizada e investigar a possibilidade de aplicação de uma formulação matemática, que possa auxiliar na obtenção de valores de reatores de neutro para condições específicas. Algumas dessas são listadas a seguir:

- Expandir a quantidade de linhas avaliadas para gerar as curvas indicativas referentes ao cenário mínimo e aplicar ajustes de curvas multivariáveis (comprimento e razão c_1/c_0). O objetivo seria buscar uma formulação matemática na mesma ou entre linhas diferentes para possibilitar a definição do reator de neutro de forma mais assertiva;
- Aplicar outras variações dentro de valores típicos de susceptâncias capacitivas (B_1 e B_0), a fim de identificar regiões nas quais o método venha a ter limitações;
- Realizar a análise para circuitos duplos e linhas fisicamente próximas, que compartilhem a mesma faixa de passagem, de forma a avaliar o impacto do acoplamento existente entre o circuito paralelo e o sistema sob falta, para identificar a presença de ressonâncias em aberturas monopolares e tripolares;
- Avaliar o impacto nos resultados a partir da inserção do efeito de saturação nos reatores;
- Cruzar as informações para um conjunto maior de dados, de forma a gerar um ábaco, que indique limitações com diferentes níveis de compensação, comprimentos, capacitâncias e razões r_h .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, R. K. et al. Neural-network based adaptive single-pole autoreclosure technique for ehv transmission systems. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 141, n. 2, p. 155–160, 1994.

ANEEL. *Relatório de Análise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/avisos-e-comunicados/-/asset_publisher/xVhS2p1F8dhn/content/relatorio-de-analise-de-desligamentos-forcados-do-sistema-de-transmissao-edicao-2017/656808?inheritRedirect=false>.

ARAUJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. [S.l.: s.n.], 2005. 261 p.

ATMURI, S. et al. Neutral reactors on shunt compensated ehv lines. In: *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 121–128.

BALOSSI, A.; MALAGUTI, M.; OSTANO, P. Laboratory full-scale tests for determination of the secondary arc extinction time in high-speed reclosing. In: *IEEE Summer Power Meeting, New Orleans*. [S.l.: s.n.], 1966.

BAN, G.; PRIKLER, L.; BANFAI, G. Testing ehv secondary arcs. In: IEEE. *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No. 01EX502)*. [S.l.], 2001. v. 4, p. 6–pp.

CAMARA, A. de Sá e B. Modelagem de arco elétrico no ar: Aplicações em sistemas de potência. (*Tese de Doutorado*) *Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)*, p. 333, 2010.

CARDOSO, I. de P. Efeitos da representação da rede em estudos de extinção de arco secundário em linhas de transmissão de potência natural elevada. (*Dissertação de Mestrado*) *Universidade Federal de Itajubá*, p. 104, 2018.

D’AJUZ, A. et al. *Transitórios elétricos e coordenação de isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*. [S.l.: s.n.], 1987.

DANTAS, K. M. et al. Phasor-based single-phase auto-reclosing scheme for non-compensated transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2021.

DIAS, O.; TAVARES, M. C. Comparison between traditional single-phase auto reclosing and adaptive technique based on harmonic content measurement. *Iet Generation Transmission & Distribution*, v. 11, p. 905–914, 2017.

EDWARDS, L. et al. Single-pole switching on tva’s paradise-davidson 500-kv line design concepts and staged fault test results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-90, n. 6, p. 2436–2450, 1971.

EPE. *Estudos de Planejamento da Transmissão*. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes-de-transmissao/estudos-de-planejamento>>.

- ESKANDARI, H.; JAFARIAN, P. Effect of interphase magnetic coupling of shunt reactor on transmission-line open-phase overvoltages and neutral reactor optimisation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 11, n. 4, p. 1004–1011, 2017.
- ESZTERGALYOS, J. et al. Single-phase tripping and auto reclosing of transmission-lines ieee committee report. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY . . . , v. 7, n. 1, p. 182–192, 1992.
- FAKHERI, E. A.; WARE, B. J.; SHPERLING, B. R. Compensation scheme for single-pole switching on untransposed transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, n. 4, p. 1421–1429, 1978.
- GODOY, E. et al. Tutorial on single-pole tripping and reclosing. In: *Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–21.
- GOLDSBOROUGH, S. L.; HILL, A. W. Relays and breakers for high-speed single-pole tripping and reclosing. *Electrical Engineering*, v. 61, n. 2, p. 77–80, 1942.
- GUZMÁN, A. et al. Transmission line protection system for increasing power system requirements. In: IEEE. *2010 Modern Electric Power Systems*. [S.l.], 2010. p. 1–11.
- HARRINGTON, E. J.; STARR, E. Deionization time of high-voltage fault-arc paths. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 68, n. 2, p. 997–1004, 1949.
- HASIBAR, R. M. et al. The application of high-speed grounding switches for single-pole reclosing on 500 kv power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 4, p. 1512–1515, 1981.
- HAUBRICH, H.-J.; HOSEMANN, G.; THOMAS, R. Single-phase auto-reclosing in ehv systems. *CIGRE*, p. 17, 1974.
- IEEE Power Systems Relaying Committee. Automatic reclosing of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103, n. 2, p. 234–245, 1984.
- JAFARIAN, P.; ESKANDARI, H.; SANAYE-PASAND, M. Sizing neutral reactor regardless of line length in shunt compensated transmission lines. In: *Proceedings of the 31th Power System Conference, Tehran, Iran*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 24–26.
- JAFARIAN, P.; ESKANDARI, H.; SANAYE-PASAND, M. Application of universal neutral reactor in shunt compensated transmission-lines: Feasibility study. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 12, 02 2018.
- JAMALI, S.; PARHAM, A. New approach to adaptive single pole auto-reclosing of power transmission lines. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 4, n. 1, p. 115–122, 2010.
- JHAIR, S. A.; TAVARES, M. C.; GOLE, A. M. Optimizing multi-circuit transmission lines for single-phase auto-reclosing. *Electric Power Systems Research - Volume 197*, ELSEVIER, 2021.
- JIAXING, N. et al. Algorithm for adaptive single-phase reclosure on shunt-reactor compensated extra high voltage transmission lines considering beat frequency oscillation. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 12, n. 13, p. 3193–3200, 2018.

- KHAN, W. A.; BI, T.; JIA, K. Fault nature identification based on local end data for single phase adaptive autoreclosing scheme. In: IEEE. *2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*. [S.l.], 2019. p. 641–646.
- KHAN, W. A.; BI, T.; JIA, K. A review of single-phase adaptive auto-reclosing schemes for ehv transmission lines. *Protection and Control of Modern Power Systems*, SpringerOpen, v. 4, n. 1, p. 1–10, 2019.
- KIMBARK, E. Suppression of ground-fault arcs on single-pole-switched ehv lines by shunt reactors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 83, p. 285–290, 1964.
- KIMBARK, E. Selective-pole switching of long double-circuit ehv line. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 95, n. 1, p. 219–230, 1976.
- KIMBARK, E. W. Bibliography on single-pole switching. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 94, n. 3, p. 1072–1076, 1975.
- KIMBARK, E. W. Correction of iee published paper suppression of ground-fault arcs on single-pole-switched ehv lines by shunt reactors. *IEEE Power Engineering Review*, PER-6, n. 6, p. 25–25, 1986.
- KNUDSEN, N. Single-phase switching of transmission lines using reactors for extinction of the secondary arc. *CIGRE*, n. 310, 1962.
- LUO, X.; HUANG, C.; JIANG, Y. Improved digital algorithm for adaptive reclosing for transmission lines with shunt reactors. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 10, n. 9, p. 2066–2070, 2016.
- LUO, X. et al. Adaptive single-phase reclosure scheme for transmission lines with shunt reactors based on current inner product. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 11, n. 7, p. 1770–1776, 2017.
- MATTOS, L. M. de; TAVARES, M. C.; MENDES, A. M. P. A new fault detection method for single-phase autoreclosing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 33, n. 6, p. 2874–2883, 2018.
- MONTANARI, A. A. et al. Secondary arc voltage and current harmonic content for field tests results. In: . [S.l.: s.n.], 2009.
- MONTANARI, A. A.; TAVARES, M. C.; PORTELA, C. M. Religamento monopolar adaptativo baseado na assinatura harmonica da tensão de arco secundario. In: . [S.l.: s.n.], 2009.
- NAGPAL, M. et al. Field verification of secondary arc extinction logic. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 4, p. 1864–1872, 2016.
- NAYAK, R. et al. Optimization of neutral grounding reactor parameters-an analysis for a double circuit ehv line. In: *2006 IEEE Power India Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 5 pp.–.
- ONS. Diretrizes para a elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão – estudos elétricos, especificação das instalações, de equipamentos e de linhas de transmissão. p. 230, 2013.

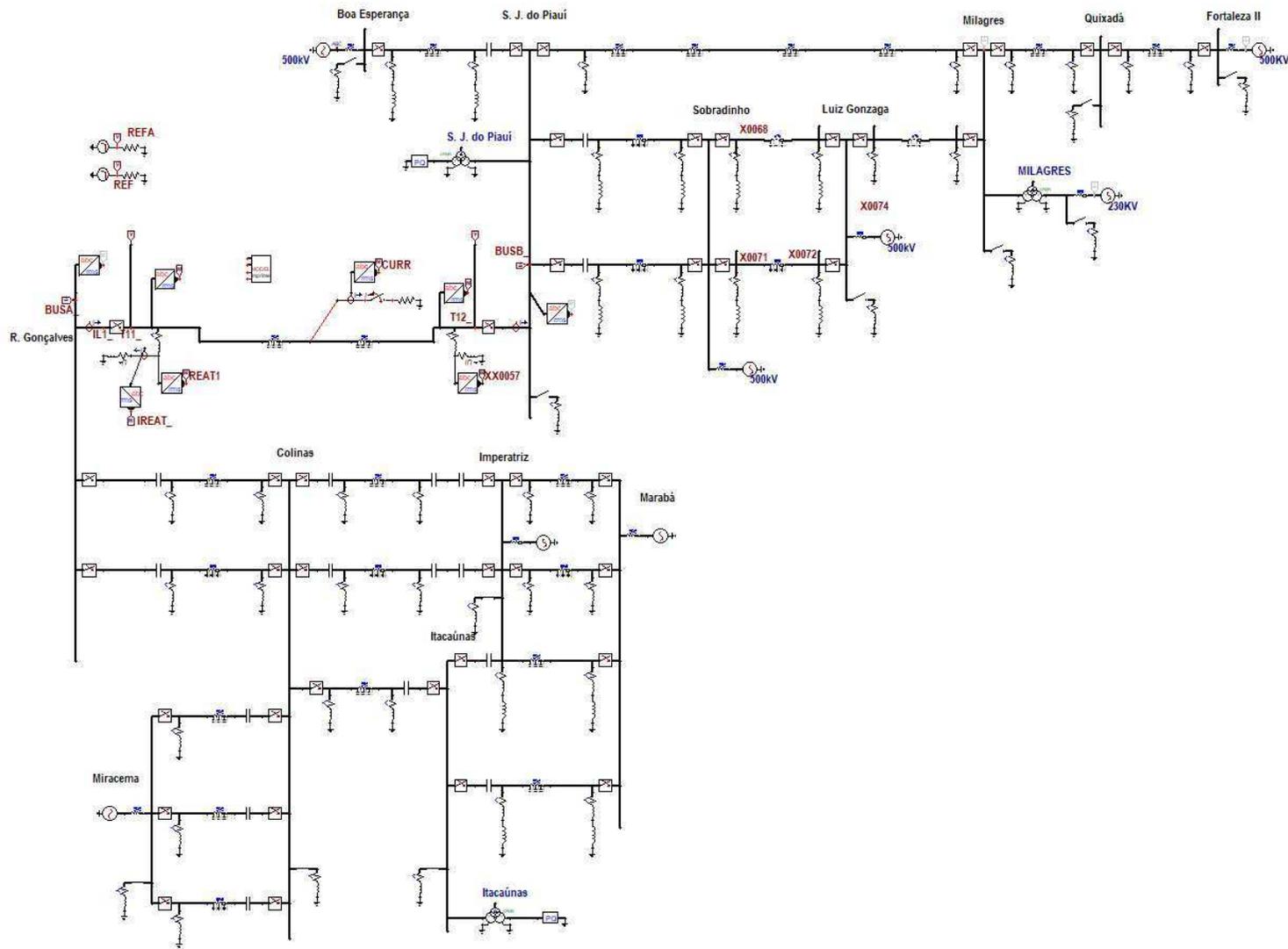
- ONS. Submódulo 2.3 dos procedimentos de rede - premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos. p. 83, 2021.
- ONS. Submódulo 7.3 dos procedimentos de rede - verificação da conformidade das instalações de transmissão aos requisitos. p. 60, 2021.
- ONS. *Resultados da Operação - Qualidade do suprimento*. 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>>.
- PORTELA, C.; OLIVEIRA, S. E. M. Principais fatores associados a extinção da corrente de arco secundário. *IV - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, p. 22, 1977.
- SARMIENTO, J. S. A.; TAVARES, M. C.; GOLE, A. M. Neutral reactor structures for improved single-phase auto-reclosing in non-conventional multi-circuit multi-voltage transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, 2021.
- SHPERLING, B. R.; FAKHERI, A. Single-phase switching parameters for untransposed ehv transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98, n. 2, p. 643–654, 1979.
- SOUZA, W. M. Nova proposta de religamento monopolar adaptativo aplicado às linhas de transmissão de extra-alta tensão. (*Dissertação de Mestrado*) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), p. 202, 2002.
- TAVARES, M.; PORTELA, C. Transmission system parameters optimization-sensitivity analysis of secondary arc current and recovery voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 3, p. 1464–1471, 2004.
- TAYLOR, C. W. et al. Single-pole switching for stability and reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1, n. 2, p. 25–36, 1986.
- TRAINOR, J.; PARKS, C. Experience with single-pole relaying and reclosing on a large 132-kv system. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 66, n. 1, p. 405–413, 1947.
- VAHIDI, B.; JANNATI, M.; HOSSEINIAN, S. H. A novel approach to adaptive single-phase autoreclosure scheme for ehv power transmission lines based on learning error function of adaline. *Simulation*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 84, n. 12, p. 601–610, 2008.
- ZADEH, M. R. D.; SANAYE-PASAND, M.; KADIVAR, A. Investigation of neutral reactor performance in reducing secondary arc current. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p. 2472–2479, 2008.
- ZANETTA, L. C.; TAHAN, C. M. V.; D’AJUZ, A. Aspectos de sobretensões ligados à aplicação do religamento monopolar em sistemas de transmissão a longa distância. *XII - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, p. 6, 1993.
- ZIVALLOS, M. E. Análise de sensibilidade da corrente de arco secundário para diferentes linhas de transmissão. (*Dissertação de Mestrado*) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), p. 176, 2007.

ZEVALLOS, M. E. Otimização de linhas de transmissão para manobra de abertura monopolar - análise da influência dos parâmetros transversais do sistema de compensação reativa. (*Tese de Doutorado*) Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), p. 161, 2013.

ZEVALLOS, M. E.; TAVARES, M. C. Redução das correntes de arco secundário em sistemas de transmissão típicos. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 20, p. 373–382, 2009.

ZHALEFAR, F.; ZADEH, M. R. D.; SIDHU, T. S. A high-speed adaptive single-phase reclosing technique based on local voltage phasors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 32, n. 3, p. 1203–1211, 2015.

Figura A.2: Sistema completo modelado no ATPDraw.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela A.1: Linhas de transmissão 500 kV - Parâmetros elétricos.

Linha de Transmissão	Sequência positiva			Sequência zero			Comprimento (km)
	R_1 (Ω/km)	X_1 (Ω/km)	Y_1 ($\mu\text{S}/\text{km}$)	R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)	Y_0 ($\mu\text{S}/\text{km}$)	
LT Fortaleza II - Quixadá	0,026	0,282	5,877	0,223	0,9	3,41	137,8
LT Quixadá - Milagres	0,026	0,282	5,881	0,242	0,872	3,448	268,7
LT Milagres - L. Gonzaga	0,024	0,283	5,895	0,242	0,858	3,421	231,2
LT Sobradinho - L. Gonzaga, C1	0,0244	0,3219	5,088	0,3221	1,353	2,782	289,5
LT Sobradinho - L. Gonzaga, C2	0,0244	0,3219	5,087	0,324	1,358	2,781	319
LT Milagres - S.J. Piauí	0,0186	0,267	6,124	0,493	1,339	2,89	400
LT S.J. Piauí - Sobradinho, C2	0,0246	0,3219	5,124	0,3764	1,411	3,092	211
LT S.J. Piauí - Sobradinho, C2	0,0186	0,267	6,124	0,493	1,339	2,89	210
LT Boa Esperança - S.J. Piauí	0,0246	0,3219	5,12	0,3763	1,411	3,064	233,8
LT S.J. Piauí - R. Gonçalves, C1	0,0186	0,267	6,124	0,493	1,339	2,89	353
LT S.J. Piauí - R. Gonçalves, C2	0,0186	0,267	6,124	0,493	1,339	2,89	353
LT Colinas- R. Gonçalves, C1	0,0186	0,267	6,124	0,493	1,339	2,89	379
LT Colinas- R. Gonçalves, C2	0,0186	0,267	6,124	0,493	1,339	2,89	379
LT Colinas - Imperatriz, C1	0,017	0,266	6,086	0,423	1,357	2,708	343
LT Colinas - Imperatriz, C2	0,017	0,266	6,086	0,423	1,357	2,708	343
LT Miracema - Colinas, C1	0,017	0,266	6,086	0,423	1,357	2,708	161
LT Miracema - Colinas, C2	0,017	0,266	6,086	0,423	1,357	2,708	161
LT Miracema - Colinas, C3	0,017	0,266	6,086	0,423	1,357	2,708	161
LT Marabá - Imperatriz, C1	0,0259	0,326	5,07	0,431	1,268	3,37	182
LT Marabá - Imperatriz, C2	0,017	0,266	6,086	0,424	1,357	2,708	182
LT Marabá - Itacaiúnas, C1	0,018	0,311	5,386	0,349	1,394	3,263	39,2
LT Marabá - Itacaiúnas, C2	0,018	0,311	5,386	0,349	1,394	3,263	39,2
LT Colinas - Itacaiúnas	0,017	0,268	6,202	0,218	0,921	3,592	304,6

Tabela A.2: Potência nominal e relação X_0/X_1 dos reatores de linha (500 kV).

Linha de Transmissão	Subestação	Potência (MVA)	X_0/X_1
Quixadá-Fortaleza II	Fortaleza II	150	-
Quixadá-Fortaleza II	Quixadá	150	-
Quixadá-Milagres	Milagres	150	-
B.Esperança - S.J. Piauí	B. Esperança	100	1,73
B.Esperança - S.J. Piauí	S.J. Piauí	100	1,7
L.Gonzaga - Milagres	L. Gonzaga	200	-
L.Gonzaga - Milagres	Milagres	100	-
Milagres - S.J.Piauí	Milagres	180	-
Milagres - S.J.Piauí	S.J.Piauí	180	-
Colinas - R.Gonçalves, C1	S.J.Piauí	180	-
Colinas - R.Gonçalves, C1	R. Gonçalves	180	-
Colinas - R.Gonçalves, C2	Colinas	180	-
Colinas - R.Gonçalves, C2	R. Gonçalves	180	-
S.J.Piauí - Sobradinho, C1	S.J. Piauí	100	1,67
S.J.Piauí - Sobradinho, C1	Sobradinho	200	1,66
S.J.Piauí - Sobradinho, C2	S.J. Piauí	100	1,67
S.J.Piauí - Sobradinho, C2	Sobradinho	200	1,66
Sobradinho - L. Gonzaga, C1	Sobradinho	100	1,66
Sobradinho - L. Gonzaga, C1	L. Gonzaga	150	1,63
Sobradinho - L. Gonzaga, C2	Sobradinho	100	1,66
Sobradinho - L. Gonzaga, C2	L. Gonzaga	150	1,68
Marabá - Imperatriz, C1	Imperatriz	149	-
Marabá - Imperatriz, C1	Marabá	132	-
Marabá - Imperatriz, C2	Imperatriz	100	-
Marabá - Imperatriz, C2	Marabá	132	-
Colinas - Itacaiúnas	Colinas	136	-
Colinas - Itacaiúnas	Itacaiúnas	136	-
Colinas - Imperatriz, C1	Colinas	272	-
Colinas - Imperatriz, C1	Imperatriz	136	-
Colinas - Imperatriz, C2	Colinas	272	-
Colinas - Imperatriz, C2	Imperatriz	136	-
Colinas - Miracema, C1/C2/C3	Miracema	136	-

Tabela A.3: Reatância dos bancos de capacitores série.

Linha de Transmissão	Subestação	Reatância (%)
B.Esperança - S.J. Piauí	S.J. Piauí	2,11
Colinas - R.Gonçalves, C1	R. Gonçalves	1,92
Colinas - R.Gonçalves, C2	R. Gonçalves	1,92
S.J.Piauí - Sobradinho, C1	S.J. Piauí	1,9
S.J.Piauí - Sobradinho, C2	S.J. Piauí	1,44
Colinas - Itacaiúnas	Itacaiúnas	1,63
Colinas - Imperatriz, C1	Colinas	0,952
Colinas - Imperatriz, C1	Colinas	0,952
Colinas - Imperatriz, C2	Imperatriz	0,952
Colinas - Imperatriz, C2	Imperatriz	0,952
Colinas - Miracema, C1	Colinas	0,952
Colinas - Miracema, C2	Colinas	0,952
Colinas - Miracema, C3	Colinas	0,952
Colinas - Imperatriz, C1	Imperatriz	0,64
Colinas - Imperatriz, C2	Imperatriz	0,64

Tabela A.4: Potência nominal e relação X_0/X_1 dos reatores de barra.

Subestação	V_{base} (kV)	Pot. (Mvar)	X_0/X_1
Milagres	230	50	1,00
Milagres	500	100	1,00
L. Gonzaga	500	100	1,00
B. Esperança	500	105	1,00
S.J. Piauí	500	100	1,00
Colinas	500	136	1,00
R. Gonçalves	500	720	1,00
Imperatriz	500	272	1,00
Itacaiúnas	500	136	1,00
Miracema	500	272	1,00
Marabá	500	495	1,00

Tabela A.5: Impedâncias equivalentes das fontes.

Subestação	Sequência Positiva		Sequência Zero	
	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
Milagres, 230 kV	7,62	44,01	1,39	14,26
Fortaleza II, 500 kV	3,9	106,61	1,98	24,49
Luiz Gonzaga, 500 kV	0,51	14,49	0,59	10,79
Sobradinho, 500 kV	0,87	84,58	0,49	21,24
Boa Esperança, 500 kV	0,41	273,33	7,79	100,94
Marabá, 500 kV	0,93	18,92	9,89	57,82
Imperatriz, 500 kV	2,69	131,3	1,8	41,9
Miracema, 500 kV	2,40	27,08	7,2	52,54

Tabela A.6: Transformadores - Impedâncias.

Subestação	Tensão (kV)			Impedância (%)			Potência (Mvar)
	P	S	T	Xps	Xpt	Xst	
Milagres	550 Y	230 Y	13,8 Δ	1,15	4,37	5,58	600
S.J. Piauí	550 Y	230 Y	13,8 Δ	3,55	15,2	11,29	300
Itacaiúnas	550 Y	230 Y	13,8 Δ	10	6,67	15	450

Tabela A.7: Curva de saturação do transformador da SE Milagres

Corrente (A)	Fluxo (V.s)
0,49222	833,835
0,56885	952,955
0,61021	1072,074
0,63869	1191,193
3,33087	1310,313
14,6738	1429,432

Tabela A.8: Curva de saturação do transformador da SE S. J. do Piauí.

Corrente (A)	Fluxo (V.s)
2,2268	1191,19
10,495	1310,313
20,1043	1429,432
32,6099	1548,552
62,5632	1667,671
111,459	1727,231
148,093	1786,79
187,629	1846,35

Tabela A.9: Curva de saturação do transformador da SE Itacaiúnas.

Corrente (A)	Fluxo (V.s)
1,3361	1191,212
3,0632	1310,333
9,2397	1369,894
44,4864	1489,015
202,4365	1565,253
1011,061	1869,012
1365,449	2047,694

APÊNDICE B

TABELAS DE DADOS - ERROS PERCENTUAIS.

Tabela B.1: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,54$ - cenário ótimo.

F	200		250		300		350		400	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,45	2,31%	2,17%	2,31%	2,17%	2,31%	2,17%	2,31%	2,17%	5,41%	0,80%
0,475	3,17%	1,29%	0,52%	2,33%	0,52%	2,33%	3,17%	1,29%	7,13%	5,19%
0,5	0,99%	0,42%	3,22%	4,57%	0,99%	0,42%	5,58%	4,10%	5,58%	4,10%
0,525	4,83%	2,70%	4,83%	2,70%	4,83%	2,70%	4,83%	2,70%	10,66%	8,41%
0,55	2,55%	0,62%	3,14%	6,14%	2,55%	0,62%	2,55%	0,62%	8,96%	5,59%
0,575	3,34%	1,01%	3,12%	7,20%	3,34%	1,01%	3,34%	1,01%	10,72%	6,06%
0,6	0,3%	5,49%	0,3%	5,49%	0,3%	5,49%	7,3%	1,78%	7,3%	1,78%
0,625	2,4%	8,14%	5,7%	0,49%	2,4%	8,14%	5,7%	0,49%	5,7%	0,49%
0,65	3,1%	9,14%	5,7%	0,88%	5,7%	0,88%	5,7%	0,88%	5,7%	0,88%
0,675	2,38%	8,55%	2,38%	8,55%	7,39%	0,60%	7,39%	0,60%	7,39%	0,60%
0,7	0,27%	6,30%	0,27%	6,30%	0,27%	6,30%	10,81%	4,11%	10,81%	4,11%
0,725	3,43%	2,20%	3,43%	2,20%	3,43%	2,20%	3,43%	2,20%	16,36%	10,02%
0,75	3,03%	7,44%	3,03%	7,44%	9,10%	4,13%	3,03%	7,44%	9,10%	4,13%
0,775	2,68%	0,79%	2,68%	0,79%	2,68%	0,79%	2,68%	0,79%	17,35%	13,38%
0,8	3,01%	4,92%	3,01%	4,92%	3,01%	4,92%	10,84%	8,66%	10,84%	8,66%
0,825	5,01%	4,68%	5,01%	4,68%	8,11%	8,41%	5,01%	4,68%	5,01%	4,67%
0,85	0,23%	1,29%	12,70%	11,37%	0,23%	1,29%	0,23%	1,29%	16,40%	18,17%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.2: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,59$ - cenário ótimo.

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,45	8,25%	4,26%	4,74%	8,25%	4,74%	8,25%	4,74%	8,25%	4,74%	8,25%
0,475	2,49%	0,39%	5,06%	2,25%	5,06%	2,25%	5,06%	2,25%	5,06%	2,25%
0,5	6,34%	1,19%	9,26%	4,28%	6,34%	1,19%	6,34%	1,19%	3,21%	2,10%
0,525	6,56%	1,16%	10,02%	4,82%	6,56%	1,16%	2,82%	2,80%	2,82%	2,80%
0,55	9,20%	4,71%	5,08%	0,38%	5,08%	0,38%	5,08%	0,38%	0,56%	4,36%
0,575	8,44%	5,11%	8,44%	5,11%	3,62%	0,11%	3,62%	0,11%	1,74%	5,44%
0,6	9,42%	7,38%	4,09%	1,93%	4,09%	1,93%	4,09%	1,93%	1,91%	4,20%
0,625	8,16%	7,23%	2,04%	1,05%	2,04%	1,05%	2,04%	1,05%	4,96%	6,02%
0,65	4,48%	4,44%	4,48%	4,44%	4,48%	4,44%	2,87%	2,92%	2,87%	2,92%
0,675	5,61%	6,18%	5,61%	6,18%	5,61%	6,18%	2,25%	1,64%	2,25%	1,64%
0,7	5,54%	6,37%	5,54%	6,37%	5,54%	6,38%	3,05%	2,14%	3,05%	2,14%
0,725	4,25%	5,03%	4,25%	5,03%	4,25%	5,03%	5,33%	4,46%	5,33%	4,46%
0,75	1,64%	2,05%	1,64%	2,05%	1,64%	2,05%	1,64%	2,05%	9,29%	8,84%
0,775	7,74%	7,46%	7,74%	7,46%	7,74%	7,46%	2,51%	2,83%	2,51%	2,83%
0,8	3,47%	2,19%	3,47%	2,19%	3,48%	2,20%	3,47%	2,19%	8,59%	10,03%
0,825	8,80%	6,42%	2,60%	5,28%	2,60%	5,28%	2,60%	5,28%	2,60%	5,28%
0,85	2,77%	1,27%	2,77%	1,27%	2,77%	1,27%	2,76%	1,27%	2,77%	1,27%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.3: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,69$ - cenário ótimo

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,525	3,91%	0,12%	6,51%	2,59%	6,51%	2,59%	8,97%	5,15%	8,97%	5,15%
0,55	7,96%	2,76%	7,96%	2,76%	7,96%	2,76%	7,96%	2,76%	10,83%	5,80%
0,575	6,61%	1,47%	6,61%	1,47%	10,07%	5,12%	10,07%	5,12%	6,61%	1,47%
0,6	3,95%	0,48%	8,13%	3,89%	8,13%	3,89%	8,13%	3,89%	8,13%	3,89%
0,625	1,55%	1,85%	6,48%	3,24%	6,48%	3,24%	6,48%	3,24%	10,93%	7,85%
0,65	6,79%	4,61%	6,79%	4,61%	6,79%	4,61%	6,79%	4,61%	6,79%	4,61%
0,675	4,93%	3,58%	4,93%	3,58%	1,41%	2,85%	4,93%	3,58%	4,93%	3,58%
0,7	7,25%	6,51%	0,63%	0,16%	0,63%	0,16%	0,63%	0,16%	0,63%	0,16%
0,725	1,40%	0,91%	1,40%	0,91%	1,40%	0,91%	1,40%	0,91%	1,40%	0,91%
0,75	8,59%	8,08%	0,98%	0,42%	0,98%	0,42%	0,98%	0,42%	0,98%	0,42%
0,775	7,71%	6,82%	7,71%	6,82%	7,71%	6,82%	0,68%	1,65%	7,71%	6,82%
0,8	5,73%	4,14%	5,73%	4,14%	5,73%	4,14%	5,73%	4,14%	5,73%	4,14%
0,825	2,51%	0,14%	2,51%	0,14%	2,51%	0,14%	2,51%	0,14%	2,51%	0,14%
0,85	8,01%	4,30%	8,01%	4,30%	8,01%	4,30%	8,01%	4,30%	8,01%	4,30%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.4: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,71$ - cenário ótimo

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,525	10,09%	7,42%	7,90%	5,17%	7,90%	5,17%	7,90%	5,17%	5,60%	2,80%
0,55	14,54%	10,10%	12,10%	7,53%	12,10%	7,53%	12,10%	7,53%	9,52%	4,81%
0,575	10,50%	5,58%	10,50%	5,58%	7,30%	2,21%	7,30%	2,20%	7,30%	2,20%
0,6	10,22%	5,88%	10,22%	5,88%	6,47%	1,96%	6,48%	1,96%	6,47%	1,96%
0,625	5,84%	2,30%	5,84%	2,30%	5,84%	2,30%	5,84%	2,30%	5,84%	2,30%
0,65	7,01%	4,54%	7,01%	4,54%	7,01%	4,54%	7,01%	4,54%	1,84%	0,76%
0,675	6,06%	4,46%	6,06%	4,46%	0,19%	1,51%	6,06%	4,46%	0,19%	1,51%
0,7	2,88%	1,88%	2,88%	1,88%	2,88%	1,88%	2,88%	1,88%	2,88%	1,88%
0,725	4,34%	3,68%	4,34%	3,68%	4,34%	3,68%	4,34%	3,68%	4,34%	3,68%
0,75	4,67%	4,01%	4,67%	4,01%	4,67%	4,01%	4,67%	4,01%	3,28%	3,99%
0,775	3,90%	2,90%	3,90%	2,90%	3,90%	2,90%	3,90%	2,90%	3,90%	2,90%
0,8	1,97%	0,28%	1,97%	0,28%	1,97%	0,28%	1,97%	0,28%	1,97%	0,28%
0,825	7,95%	5,45%	7,95%	5,45%	1,26%	4,01%	1,26%	4,01%	1,26%	4,01%
0,85	13,24%	9,77%	4,56%	0,74%	4,56%	0,74%	4,56%	0,74%	4,56%	0,74%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.5: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,75$ - cenário ótimo

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,55	8,73%	10,87%	11,01%	13,10%	8,73%	10,87%	8,73%	10,87%	6,32%	8,52%
0,575	7,86%	8,52%	10,65%	11,30%	10,65%	11,30%	10,65%	11,30%	10,65%	11,30%
0,6	6,79%	7,26%	10,12%	10,57%	10,12%	10,57%	6,79%	7,26%	10,12%	10,57%
0,625	8,54%	9,40%	8,54%	9,40%	8,54%	9,40%	8,54%	9,40%	12,20%	13,03%
0,65	7,32%	8,82%	11,53%	12,96%	7,32%	8,82%	11,53%	12,96%	11,53%	12,96%
0,675	7,99%	10,07%	7,99%	10,07%	7,99%	10,07%	7,99%	10,07%	7,99%	10,07%
0,7	6,67%	9,21%	6,67%	9,21%	6,67%	9,21%	6,67%	9,21%	6,67%	9,21%
0,725	9,22%	11,87%	9,22%	11,87%	9,22%	11,87%	9,22%	11,87%	9,22%	11,87%
0,75	10,72%	13,24%	4,34%	7,04%	4,34%	7,04%	4,34%	7,04%	4,34%	7,04%
0,775	11,26%	13,39%	4,44%	6,73%	4,43%	6,73%	4,44%	6,73%	4,43%	6,73%
0,8	3,45%	5,06%	3,45%	5,06%	3,45%	5,06%	3,45%	5,06%	3,45%	5,06%
0,825	9,56%	10,13%	9,56%	10,13%	9,56%	10,13%	9,55%	10,13%	9,55%	10,13%
0,85	7,20%	6,57%	7,20%	6,57%	7,20%	6,57%	7,20%	6,57%	7,20%	6,57%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.6: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,78$ - cenário ótimo

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,575	14,43%	12,59%	12,12%	10,23%	12,12%	10,23%	14,43%	12,59%	12,12%	10,23%
0,6	11,48%	9,15%	8,52%	6,12%	8,52%	6,12%	14,24%	11,99%	8,52%	6,12%
0,625	8,70%	6,71%	8,70%	6,71%	8,70%	6,71%	8,70%	6,71%	8,70%	6,71%
0,65	9,06%	7,83%	4,93%	3,64%	9,06%	7,83%	9,06%	7,83%	9,06%	7,83%
0,675	6,53%	6,07%	6,53%	6,07%	6,53%	6,07%	6,53%	6,07%	6,53%	6,07%
0,7	6,12%	6,30%	6,12%	6,30%	6,12%	6,30%	6,12%	6,30%	6,12%	6,30%
0,725	3,65%	4,23%	3,65%	4,23%	3,65%	4,23%	3,65%	4,23%	3,65%	4,23%
0,75	5,50%	6,16%	5,50%	6,16%	5,50%	6,16%	5,50%	6,16%	5,50%	6,16%
0,775	6,30%	6,71%	6,30%	6,71%	6,30%	6,71%	6,30%	6,71%	6,30%	6,71%
0,8	6,10%	5,95%	6,10%	5,95%	6,10%	5,95%	6,10%	5,95%	6,10%	5,95%
0,825	4,88%	3,84%	4,88%	3,84%	4,88%	3,84%	4,88%	3,84%	4,88%	3,84%
0,85	2,55%	0,29%	2,55%	0,29%	2,55%	0,29%	2,55%	0,29%	2,55%	0,29%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.7: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,79$ - cenário ótimo

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,575	18,60%	11,06%	16,57%	8,84%	14,43%	6,50%	14,43%	6,50%	18,60%	11,06%
0,6	19,78%	12,28%	19,78%	12,28%	17,42%	9,70%	17,42%	9,70%	14,92%	6,96%
0,625	16,44%	9,42%	16,44%	9,42%	16,44%	9,42%	13,45%	6,18%	16,44%	9,42%
0,65	14,74%	8,72%	14,74%	8,72%	14,74%	8,72%	11,19%	4,91%	14,74%	8,72%
0,675	9,41%	4,22%	9,41%	4,22%	13,53%	8,57%	13,53%	8,57%	13,53%	8,57%
0,7	9,60%	5,43%	9,60%	5,43%	14,12%	10,15%	9,60%	5,43%	14,12%	10,16%
0,725	13,02%	9,69%	13,02%	9,69%	7,90%	4,38%	13,02%	9,69%	7,90%	4,38%
0,75	15,38%	12,49%	10,10%	7,02%	10,10%	7,02%	10,10%	7,02%	10,10%	7,02%
0,775	11,31%	8,28%	11,31%	8,28%	11,31%	8,28%	11,31%	8,28%	11,31%	8,28%
0,8	11,62%	8,26%	11,62%	8,26%	11,62%	8,26%	11,62%	8,26%	11,62%	8,26%
0,825	11,04%	6,97%	11,04%	6,97%	11,04%	6,97%	11,04%	6,97%	11,04%	6,97%
0,85	9,54%	4,39%	9,54%	4,39%	9,54%	4,39%	9,54%	4,39%	9,54%	4,39%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.8: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,84$ - cenário ótimo

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,6	11,90%	12,03%	9,38%	9,52%	9,38%	9,52%	6,71%	6,86%	9,38%	9,52%
0,625	9,93%	9,89%	6,83%	6,78%	9,93%	9,89%	6,83%	6,78%	9,93%	9,89%
0,65	5,86%	6,26%	1,94%	2,36%	5,86%	6,27%	5,86%	6,26%	5,86%	6,26%
0,675	5,25%	6,30%	5,25%	6,30%	5,25%	6,30%	0,73%	1,84%	5,25%	6,30%
0,7	6,46%	8,09%	1,53%	3,25%	1,53%	3,25%	1,53%	3,25%	1,53%	3,25%
0,725	0,18%	2,33%	0,18%	2,33%	0,18%	2,33%	0,18%	2,33%	0,18%	2,33%
0,75	2,97%	5,17%	2,97%	5,17%	2,97%	5,17%	3,50%	1,16%	2,97%	5,17%
0,775	4,62%	6,56%	4,62%	6,56%	4,62%	6,56%	4,62%	6,56%	2,20%	0,11%
0,8	2,06%	0,55%	5,23%	6,63%	5,23%	6,63%	5,23%	6,63%	2,06%	0,55%
0,825	4,86%	5,41%	4,86%	5,41%	4,86%	5,41%	3,07%	2,47%	3,07%	2,47%
0,85	3,48%	2,85%	3,48%	2,85%	3,48%	2,85%	3,48%	2,85%	5,30%	5,98%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.10: Erro percentual no cálculo do reator de neutro com $c_1/c_0 = 1,87$ - cenário ótimo

F	200 km		250 km		300 km		350 km		400 km	
	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho	Analítico	Trabalho
0,6	14,09%	5,77%	16,19%	8,07%	16,19%	8,07%	14,09%	5,77%	14,09%	5,77%
0,625	14,70%	6,72%	14,70%	6,72%	14,70%	6,72%	12,12%	3,90%	14,70%	6,72%
0,65	10,40%	3,11%	10,40%	3,11%	13,49%	6,45%	10,40%	3,11%	13,49%	6,45%
0,675	11,58%	5,69%	11,58%	5,69%	11,58%	5,69%	11,58%	5,69%	11,58%	5,69%
0,7	10,20%	5,45%	14,11%	9,56%	10,20%	5,45%	10,20%	5,45%	10,20%	5,45%
0,725	10,71%	6,95%	10,71%	6,95%	10,71%	6,95%	10,71%	6,95%	6,01%	2,05%
0,75	9,48%	6,30%	9,48%	6,30%	9,48%	6,30%	9,48%	6,30%	4,16%	0,78%
0,775	6,37%	3,31%	6,37%	3,31%	6,38%	3,31%	6,37%	3,31%	6,37%	3,31%
0,8	7,58%	4,39%	7,58%	4,39%	7,58%	4,39%	7,58%	4,39%	7,58%	4,39%
0,825	7,85%	4,11%	7,85%	4,11%	7,85%	4,11%	7,85%	4,11%	7,85%	4,11%
0,85	7,20%	2,50%	7,20%	2,50%	7,20%	2,50%	7,20%	2,50%	7,20%	2,50%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.11: Erros encontrados para aproximação da média de r_h para todas as LTs (Pt. 1) - cenário ótimo.

c_1/c_0	L (km)	Coeficientes $aF^b + c$			Compensação (F)								erro (%)							
		a	b	c	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
1,54	Média	0,08	-4,462	1,545	3,31	2,70	2,33	2,09	1,94	1,83	1,76	1,71	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	0,087	-4,336	1,549	3,31	2,72	2,35	2,11	1,96	1,85	1,78	1,73	0,17%	0,70%	0,97%	1,07%	1,08%	1,03%	0,96%	0,88%
	250	0,088	-4,354	1,537	3,34	2,73	2,35	2,11	1,95	1,85	1,77	1,72	0,99%	1,13%	1,10%	0,97%	0,80%	0,63%	0,46%	0,32%
	300	0,085	-4,385	1,551	3,33	2,72	2,35	2,11	1,96	1,85	1,78	1,72	0,68%	0,93%	1,05%	1,07%	1,04%	0,98%	0,92%	0,86%
	350	0,078	-4,489	1,551	3,30	2,69	2,32	2,09	1,94	1,83	1,76	1,71	0,29%	0,27%	0,21%	0,13%	0,06%	0,01%	0,07%	0,12%
	400	0,063	-4,751	1,535	3,24	2,62	2,25	2,03	1,88	1,78	1,72	1,67	2,04%	2,94%	3,28%	3,27%	3,08%	2,82%	2,54%	2,28%
1,59	Média	0,110	-4,520	1,587	4,11	3,23	2,69	2,36	2,14	1,99	1,89	1,82	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	0,166	-3,966	1,512	4,10	3,29	2,77	2,43	2,19	2,03	1,91	1,83	0,22%	1,80%	2,69%	2,83%	2,52%	1,96%	1,29%	0,61%
	250	0,124	-4,383	1,568	4,16	3,28	2,74	2,39	2,16	2,01	1,90	1,82	1,25%	1,51%	1,50%	1,33%	1,08%	0,81%	0,54%	0,29%
	300	0,104	-4,578	1,618	4,11	3,23	2,70	2,37	2,15	2,01	1,91	1,84	0,03%	0,09%	0,25%	0,45%	0,66%	0,86%	1,03%	1,18%
	350	0,095	-4,723	1,598	4,09	3,19	2,65	2,32	2,11	1,97	1,87	1,80	0,39%	1,18%	1,53%	1,58%	1,46%	1,26%	1,03%	0,81%
	400	0,077	-4,976	1,617	4,05	3,13	2,60	2,28	2,07	1,94	1,85	1,79	1,58%	3,14%	3,70%	3,62%	3,18%	2,61%	2,01%	1,45%
1,69	Média	0,135	-4,831	1,687	5,53	4,11	3,28	2,77	2,44	2,23	2,08	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	0,132	-4,791	1,720	5,38	4,04	3,25	2,76	2,45	2,24	2,11	2,01	2,71%	1,76%	0,93%	0,25%	0,29%	0,71%	1,01%	1,24%
	250	0,139	-4,781	1,682	5,49	4,10	3,27	2,77	2,44	2,23	2,08	1,98	0,71%	0,37%	0,15%	0,02%	0,03%	0,04%	0,03%	0,00%
	300	0,139	-4,794	1,672	5,52	4,11	3,28	2,77	2,44	2,22	2,08	1,97	0,09%	0,01%	0,01%	0,06%	0,15%	0,25%	0,34%	0,43%
	350	0,134	-4,880	1,670	5,62	4,15	3,29	2,77	2,44	2,22	2,07	1,97	1,64%	0,97%	0,42%	0,02%	0,34%	0,56%	0,72%	0,83%
	400	0,132	-4,903	1,689	5,64	4,17	3,31	2,78	2,45	2,23	2,08	1,98	1,99%	1,31%	0,81%	0,45%	0,23%	0,09%	0,01%	0,02%
1,71	Média	0,133	-5,044	1,709	6,10	4,42	3,46	2,88	2,51	2,28	2,12	2,01	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	0,127	-5,154	1,721	6,26	4,50	3,49	2,89	2,52	2,28	2,12	2,02	2,56%	1,66%	1,01%	0,60%	0,37%	0,26%	0,23%	0,24%
	250	0,148	-4,892	1,682	6,07	4,44	3,48	2,90	2,53	2,29	2,12	2,01	0,43%	0,30%	0,66%	0,73%	0,62%	0,42%	0,18%	0,06%
	300	0,122	-5,161	1,746	6,09	4,40	3,44	2,87	2,51	2,28	2,13	2,03	0,03%	0,39%	0,45%	0,31%	0,05%	0,24%	0,53%	0,78%
	350	0,136	-5,012	1,696	6,07	4,41	3,45	2,87	2,51	2,27	2,11	2,00	0,47%	0,33%	0,26%	0,26%	0,29%	0,34%	0,40%	0,45%
	400	0,133	-5,001	1,699	5,95	4,34	3,41	2,84	2,49	2,26	2,10	2,00	2,48%	1,94%	1,51%	1,18%	0,95%	0,80%	0,70%	0,63%
1,75	Média	0,163	-4,951	1,746	6,79	4,89	3,79	3,12	2,70	2,42	2,24	2,11	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	0,160	-4,951	1,764	6,71	4,85	3,77	3,11	2,70	2,43	2,25	2,12	1,22%	0,91%	0,59%	0,29%	0,03%	0,20%	0,38%	0,52%
	250	0,155	-5,070	1,755	6,97	4,97	3,83	3,14	2,70	2,42	2,24	2,11	2,68%	1,67%	0,93%	0,43%	0,14%	0,02%	0,07%	0,07%
	300	0,163	-4,961	1,740	6,82	4,91	3,80	3,12	2,70	2,42	2,23	2,11	0,50%	0,33%	0,18%	0,05%	0,05%	0,12%	0,18%	0,22%
	350	0,170	-4,890	1,732	6,76	4,89	3,79	3,13	2,70	2,42	2,24	2,11	0,40%	0,08%	0,09%	0,15%	0,12%	0,05%	0,04%	0,14%
	400	0,169	-4,879	1,735	6,71	4,86	3,78	3,12	2,70	2,42	2,24	2,11	1,20%	0,68%	0,33%	0,12%	0,03%	0,01%	0,04%	0,09%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela B.12: Erros encontrados para aproximação da média de r_h para todas as LTs (Pt. 2) - cenário ótimo.

c_1/c_0	L (km)	Coeficientes $a * F^b + c$			Compensação (F)									erro (%)								
		a	b	c	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85		
1,78	Média	0,145	-5,424	1,792	8,02	5,50	4,11	3,29	2,80	2,48	2,28	2,14	-	-	-	-	-	-	-	-		
	200	0,142	-5,474	1,796	8,09	5,53	4,12	3,29	2,79	2,48	2,28	2,14	0,88%	0,47%	0,18%	0,00%	0,09%	0,12%	0,11%	0,09%		
	250	0,147	-5,356	1,797	7,81	5,41	4,06	3,27	2,79	2,48	2,28	2,15	2,66%	1,82%	1,14%	0,61%	0,24%	0,01%	0,16%	0,26%		
	300	0,140	-5,472	1,803	8,02	5,50	4,10	3,28	2,79	2,48	2,28	2,14	0,07%	0,17%	0,27%	0,27%	0,21%	0,11%	0,00%	0,10%		
	350	0,154	-5,348	1,763	8,05	5,54	4,14	3,31	2,80	2,48	2,27	2,13	0,45%	0,67%	0,67%	0,52%	0,27%	0,01%	0,28%	0,52%		
	400	0,140	-5,472	1,803	8,02	5,50	4,10	3,28	2,79	2,48	2,28	2,14	0,07%	0,17%	0,27%	0,27%	0,21%	0,11%	0,00%	0,10%		
1,79	Média	0,162	-5,397	1,808	8,63	5,89	4,36	3,46	2,92	2,57	2,35	2,20	-	-	-	-	-	-	-	-		
	200	0,152	-5,496	1,824	8,69	5,89	4,34	3,45	2,90	2,56	2,34	2,20	0,61%	0,01%	0,37%	0,52%	0,50%	0,40%	0,25%	0,09%		
	250	0,177	-5,274	1,752	8,58	5,88	4,36	3,46	2,91	2,56	2,32	2,17	0,60%	0,09%	0,08%	0,02%	0,29%	0,65%	1,02%	1,37%		
	300	0,149	-5,573	1,845	8,92	6,00	4,41	3,48	2,93	2,58	2,36	2,21	3,17%	1,90%	1,04%	0,56%	0,38%	0,39%	0,52%	0,69%		
	350	0,151	-5,469	1,856	8,54	5,83	4,32	3,45	2,92	2,58	2,37	2,22	1,06%	1,07%	0,85%	0,47%	0,02%	0,42%	0,82%	1,16%		
	400	0,183	-5,176	1,759	8,37	5,80	4,33	3,46	2,92	2,57	2,34	2,18	3,11%	1,57%	0,60%	0,12%	0,00%	0,12%	0,35%	0,64%		
1,84	Média	0,152	-5,614	1,841	9,29	6,20	4,52	3,55	2,97	2,61	2,37	2,22	-	-	-	-	-	-	-	-		
	200	0,147	-5,716	1,837	9,56	6,32	4,56	3,56	2,97	2,60	2,36	2,21	2,89%	1,85%	1,01%	0,38%	0,03%	0,28%	0,41%	0,47%		
	250	0,165	-5,446	1,827	9,02	6,11	4,49	3,55	2,98	2,62	2,38	2,23	2,90%	1,49%	0,50%	0,10%	0,40%	0,49%	0,45%	0,35%		
	300	0,166	-5,456	1,816	9,09	6,14	4,51	3,55	2,98	2,61	2,38	2,22	2,14%	0,97%	0,21%	0,19%	0,32%	0,27%	0,13%	0,05%		
	350	0,163	-5,460	1,827	9,01	6,09	4,48	3,54	2,97	2,61	2,38	2,22	3,08%	1,74%	0,78%	0,19%	0,13%	0,24%	0,23%	0,16%		
	400	0,124	-5,979	1,892	9,73	6,33	4,53	3,53	2,94	2,59	2,36	2,22	4,62%	2,01%	0,28%	0,63%	0,89%	0,74%	0,38%	0,04%		
1,85	Média	0,160	-5,675	1,861	10,04	6,62	4,77	3,71	3,07	2,68	2,43	2,26	-	-	-	-	-	-	-	-		
	200	0,171	-5,581	1,861	10,06	6,68	4,83	3,76	3,12	2,71	2,46	2,29	0,27%	0,88%	1,25%	1,39%	1,38%	1,27%	1,12%	0,96%		
	250	0,167	-5,603	1,877	9,97	6,62	4,79	3,74	3,11	2,71	2,46	2,29	0,62%	0,04%	0,54%	0,88%	1,08%	1,18%	1,21%	1,20%		
	300	0,177	-5,488	1,841	9,77	6,54	4,76	3,72	3,09	2,70	2,44	2,27	2,69%	1,20%	0,18%	0,40%	0,65%	0,67%	0,55%	0,37%		
	350	0,142	-5,871	1,855	10,15	6,59	4,70	3,63	3,00	2,62	2,38	2,22	1,08%	0,42%	1,46%	2,03%	2,24%	2,21%	2,04%	1,83%		
	400	0,149	-5,827	1,867	10,34	6,73	4,80	3,70	3,06	2,67	2,42	2,25	2,94%	1,62%	0,62%	0,03%	0,40%	0,55%	0,56%	0,51%		
1,87	Média	0,177	-5,637	1,876	10,68	7,02	5,03	3,88	3,20	2,77	2,50	2,32	-	-	-	-	-	-	-	-		
	200	0,187	-5,521	1,857	10,45	6,93	5,00	3,88	3,20	2,77	2,50	2,32	2,24%	1,28%	0,60%	0,19%	0,00%	0,04%	0,01%	0,10%		
	250	0,176	-5,670	1,879	10,84	7,10	5,07	3,90	3,21	2,78	2,50	2,32	1,44%	1,07%	0,76%	0,52%	0,35%	0,24%	0,17%	0,13%		
	300	0,173	-5,714	1,878	10,97	7,15	5,08	3,91	3,21	2,77	2,50	2,32	2,59%	1,79%	1,12%	0,62%	0,28%	0,06%	0,06%	0,11%		
	350	0,182	-5,541	1,873	10,36	6,88	4,96	3,86	3,19	2,77	2,50	2,32	3,14%	2,11%	1,30%	0,70%	0,29%	0,05%	0,08%	0,13%		
	400	0,167	-5,732	1,892	10,75	7,02	5,01	3,86	3,18	2,76	2,49	2,31	0,66%	0,01%	0,39%	0,56%	0,57%	0,47%	0,31%	0,15%		

Fonte: Autoria Própria.