

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
(PPEE)

José Carlos de Faria Martins

Avaliação dos impactos das variações sistêmicas nas análises de viabilidade do
religamento monopolar através do ATP via Python

Juiz de Fora

2024

José Carlos de Faria Martins

Avaliação dos impactos das variações sistêmicas nas análises de viabilidade do religamento monopolar através do ATP via Python

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Aroca Tomim

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Martins, José Carlos de Faria.

Avaliação dos impactos das variações sistêmicas nas análises de viabilidade do religamento monopolar através do ATP via Python / José Carlos de Faria Martins. – 2024.

104 f. : il.

Orientador: Marcelo Aroca Tomim

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE), 2024.

1. Religamento Automático Monopolar. 2. Corrente de Arco Secundário. 3. ATP. 4. Python. 5. Linhas de Potência Natural Elevada. Tomim, Aroca Marcelo., orient. II. Título.

José Carlos de Faria Martins

Avaliação dos impactos das variações sistêmicas nas análises de viabilidade do religamento monopolar através do ATP via Python

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Aprovada em 07 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Aroca Tomim - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marco Aurelio de Oliveira Schroeder
Universidade Federal São João del-Rei

Prof. Dr. Pedro Gomes Barbosa
Universidade Federal de Juiz de Fora



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Gomes Barbosa, Coordenador(a)**, em 07/02/2024, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Aroca Tomim, Professor(a)**, em 07/02/2024, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Aurelio de Oliveira Schroeder, Usuário Externo**, em 07/02/2024, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE CARLOS DE FARIA MARTINS, Usuário Externo**, em 07/02/2024, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1660084** e o código CRC **8C3A185C**.

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me concedido saúde, sabedoria e força durante todo o percurso. Foi Tua presença constante que me deu ânimo para enfrentar os desafios, superar as dificuldades e perseverar diante dos momentos mais desafiadores dessa jornada.

À minha família. Em especial minha avó, Jorcelina, pela plena confiança e apoio incondicional em toda minha trajetória acadêmica. Você é minha maior inspiração, minha referência de coragem, perseverança e bondade. Agradeço por todo o amor e sacrifícios que fez por mim. A minha mãe Elizângela, ao meu padrasto José Antônio e minhas irmãs Kariny e Francinely pelo amor, carinho e companheirismo em todos os momentos. A todos os meus tios, tias e primas que me incentivaram a concluir meu sonho.

À minha namorada, Eiza pelo apoio e confiança no trabalho. Sua presença amorosa e constante em minha vida foi um verdadeiro suporte, encorajando-me a persistir mesmo nos momentos mais difíceis. Além de sua compreensão nas horas e dias dedicados a este trabalho.

Ao meu orientador, Marcelo Aroca Tomim, pela inspiração profissional, transferência de conhecimento e, principalmente, pela paciência e compreensão na elaboração desse trabalho. Levarei como eterno aprendizado seu amor pelo trabalho e dedicação imensurável no papel de professor e orientador. Ao Pedro Gomes Barbosa pelo apoio técnico e incentivo nesta etapa.

Aos profissionais e amigos engenheiros do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) Igor Borges de Oliveira Chagas, Jeanderson Soares Mingorança, Luis Arthur Novaes, Antônio Sobrinho Campolina Martins, Glauber Daniel Souza do Vale, Fernando Rocha Moreira de Souza Costa e Marina Martins Mattos pela longa parceria durante nossa formação e pelo apoio mútuo e conhecimentos transferidos nesse período.

À Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e ao PPEE pelas portas abertas, confiança e oportunidade de capacitação e formação pessoal e técnica. Ao Operador Nacional do Sistema (ONS) pelo apoio técnico e compreensão nessa jornada. Ao Adriano de Andrade Barbosa pelo encorajamento na continuação deste trabalho e aos meus demais companheiros de equipe: Daniel Sinder, Thiago Ferreira da Silva Costa, Estefânia Teixeira Perro, Isabela d'Ávila Metzker, Luiz Filipe Alvarenga e Sérgio Cordeiro Sobral por todos os ensinamentos e capacitação técnica.

Aos meus demais colegas e amigos da graduação e da pós-graduação da UFJF e aos meus colegas do ONS pela amizade no decorrer destes anos e por tornarem esta caminhada mais leve.

Meus sinceros muito obrigado!

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.
(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma nova abordagem para a avaliação dos impactos das variações sistêmicas nas análises de viabilidade do Religamento Automático Monopolar (RAM) realizadas na etapa de Projeto Básico (PB) nas linhas que se integram ao Sistema Interligado Nacional (SIN). De acordo com as estatísticas, aproximadamente 80% dos curtos-circuitos no sistema elétrico de potência são causadas por faltas fase para a terra. Neste contexto, sempre que possível, recomenda-se adotar a prática do religamento monopolar em vez do religamento tripolar, devido aos seus benefícios sistêmicos como: menores esforços torcionais nas máquinas, menores sobretensões transitórias durante a manobra, além de redução na intensidade e duração dos afundamentos de tensão etc. O sucesso do RAM está intimamente ligado à eliminação da corrente de arco secundário induzida pelas fases sãs e circuitos que porventura operam em paralelo. Portanto, na etapa de projeto das novas linhas de transmissão, é essencial buscar alternativas que minimizem a corrente de arco secundário que conseqüentemente aumenta a probabilidade de sucesso da manobra. A avaliação de tais alternativas é comumente realizada com o auxílio de programas de transitórios eletromagnéticos, como ATP, PSCAD, EMTP-RV entre outros. Nesta dissertação, a solução transitória do sistema será realizada no ATP. Embora este *software* possua recursos para computar múltiplos cenários, gerenciar e analisar os impactos de diversas variações aplicadas no sistema nas respostas transitórias pode se tornar uma árdua tarefa facilmente sujeita a erros. Diante do exposto, o principal objetivo do presente trabalho é apresentar uma metodologia que permite realizar simulações no ATP por meio de algoritmos mestres, implementados em Python, que podem operar os arquivos .ATP para executar simulações específicas com parâmetros pré-definidos. Dessa forma, torna-se possível analisar o comportamento da corrente do arco secundário e das sobretensões transitórias induzidas no sistema em função da variação de parâmetros como: o valor do reator de neutro, o comprimento da linha, o nível de compensação, a topologia da silhueta típica da linha etc. Para os estudos de caso, foram consideradas estruturas típicas para os níveis de tensão de 230 e 500 kV. Para este último, foram modeladas linhas convencionais e Linhas de Potência Natural Elevada (LPNE) que tem se tornado cada vez mais comum nas soluções de planejamento para escoar grandes montantes de gerações até os centros de carga. Como resultados, o trabalho apresenta de forma gráfica o comportamento das grandezas monitoradas nas análises do RAM em função das alterações supracitadas para cada linha em estudo. Esses gráficos, permitem uma análise de sensibilidade e podem auxiliar no projeto e definição de soluções que busquem a viabilização do religamento monopolar.

Palavras-chave: Religamento Automático Monopolar; Corrente de Arco Secundário; ATP; Python; Linhas de Potência Natural Elevada.

ABSTRACT

This dissertation presents a new approach to evaluate the impacts of systemic variations on the success analysis of the monopolar auto reclosing performed in the basic design stage for transmission lines integrated into the national interconnected system. As shown in the statistics, approximately 80 % of short circuits in the power system are caused by phase-to-ground faults. In this context, whenever possible, it is recommended to adopt the practice of monopolar reclosing instead of tripolar reclosing, due to its systemic benefits such as reduced torsional stresses on machines, lower transient overvoltage during switching operations, and reduction in the intensity and duration of voltage sags, among others. The success of monopolar auto reclosing is closely related to the elimination of secondary arc currents induced by healthy phases and parallel-operating circuits. Therefore, in the design stage of new transmission lines, it is essential to seek alternatives that minimize the secondary arc current, which consequently increases the probability of successful reclosing. The evaluation of such alternatives is commonly performed using electromagnetic transient programs such as ATP, PSCAD, EMTP-RV, among others. In this dissertation, the transient solution of the system will be carried out using ATP. Although this software has features to compute multiple scenarios, managing and analyzing the impacts of various system variations on transient responses can become a challenging task prone to errors. Considering the above, the main objective of this work is to present a methodology that allows simulations in ATP through master algorithms implemented in Python, which can operate ATP files to perform specific simulations with predefined parameters. Thus, it becomes possible to analyze the behavior of secondary arc current and transient overvoltage induced in the system as a function of parameter variations such as the neutral reactor value, line length, compensation level, typical line silhouette topology, etc. For the case studies, typical structures were considered for voltage levels of 230 and 500 kV. For the latter, both conventional and high surge impedance loading lines were modeled, which have become increasingly common in planning solutions for carrying large amounts of generation to load centers. As results, the work graphically presents the behavior of monitored quantities in the monopolar auto reclosing analysis as a function of the changes for each studied line. These graphs allow for sensitivity analysis and can assist in the design and definition of solutions that seek to enable monopolar reclosing.

Keywords: Monopolar Auto Reclosing; Secondary Arc Current; ATP; Python; High Surge Impedance Loading Lines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Natureza elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão entre 2017 e 2021.	26
Figura 2 – Eventos no RA.	27
Figura 3 – Comportamento da corrente durante a falta monofásica.	30
Figura 4 – Tensão de reestabelecimento transitória (TRT).	32
Figura 5 – Curva indicativa para análise da extinção da corrente de arco secundário.	36
Figura 6 – Curva indicativa para análise da extinção da corrente de arco secundário em função do tempo morto.	37
Figura 7 – Diagrama de ligação de reatores de neutro X_n	38
Figura 8 – Rede retida e suas vizinhanças.	41
Figura 9 – Fluxograma de gerenciamento das simulações.	45
Figura 10 – Rotina para execução do ATP.	46
Figura 11 – Representação do elemento RLC no ATP.	46
Figura 12 – Modelagem da linha através do LCC no ATPDraw.	48
Figura 13 – Parâmetros a serem inseridos no LCC.	48
Figura 14 – Feixe com 4 condutores.	49
Figura 15 – Representação da linha no .DAT	50
Figura 16 – Diagrama da modelagem das linhas em análise.	54
Figura 17 – Primeiro critério - variação do comprimento da LT de 230 kV.	56
Figura 18 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento da LT de 230 kV.	57
Figura 19 – Tensão da fase aberta da LT de 500 kV para as condições iniciais.	58
Figura 20 – Primeiro critério - Variação do comprimento da LT de 500 kV.	59
Figura 21 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento da LT de 500 kV.	60
Figura 22 – Tensão nos reatores de neutro da LT de 500 kV.	61
Figura 23 – Critério 1 - Variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV.	62
Figura 24 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV.	63
Figura 25 – Tensão nos reatores de neutro em função da variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV.	64
Figura 26 – Critério 1 - Variação do reator de neutro da LT de 500 kV.	65
Figura 27 – Tensão da fase aberta em função do reator de neutro da LT de 500 kV.	66
Figura 28 – Tensão nos reatores de neutro da LT de 500 kV em função da variação de seu valor ôhmico.	67
Figura 29 – Critério 1 - Variação do comprimento da LPNE de 500 kV.	68

Figura 30 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento da LPNE de 500 kV.	69
Figura 31 – Tensão nos reatores de neutro da LPNE de 500 kV.	70
Figura 32 – Critério 1 - Variação do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.	71
Figura 33 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.	72
Figura 34 – Tensão nos reatores de neutro em função da variação do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.	73
Figura 35 – Critério 1 - Variação do reator de neutro da LPNE de 500 kV.	74
Figura 36 – Tensão da fase aberta em função do reator de neutro da LPNE de 500 kV.	75
Figura 37 – Tensão nos reatores de neutro da LPNE de 500 kV em função da variação de seu valor ôhmico.	76
Figura 38 – Diagrama da modelagem da linha considerando duas estruturas típicas.	78
Figura 39 – Critério 1 - Variação da porcentagem de estruturas autoportantes na LPNE de 500 kV.	78
Figura 40 – Tensão da fase aberta da LPNE de 500 kV em função da variação a porcentagem de estruturas autoportantes.	79
Figura 41 – Tensão nos reatores de neutro da LPNE de 500 kV em função da variação a porcentagem de estruturas autoportantes.	80
Figura 42 – Estrutura monomastro estaiada (vela).	89
Figura 43 – Cálculo do LCC para linha de 230 kV.	90
Figura 44 – Estrutura monomastro estaiada (cara de gato).	91
Figura 45 – Cálculo do LCC para linha de 500 kV.	93
Figura 46 – Estrutura <i>cross rope</i>	94
Figura 47 – Cálculo do LCC para torre <i>cross-rope</i> da LPNE de 500 kV.	96
Figura 48 – Estrutura autoportante (cara de gato).	97
Figura 49 – Cálculo do LCC para torre cara de gato da LPNE de 500 kV.	99
Figura 50 – Código principal.	100
Figura 51 – Função para construção e execução de um novo caso.	101
Figura 52 – Função para identificação do campo que será alterado.	102
Figura 53 – Função para interpretação dos resultados.	103
Figura 54 – Exemplo de estrutura de dados da aba ALTERACAO RT no excel.	104
Figura 55 – Exemplo de estrutura de dados da aba VARIAVEIS no excel.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Natureza elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão em 2021.	26
Tabela 2 – Esquemas de RA das linhas de transmissão da RB por nível de tensão - 2018 a 2022.	27
Tabela 3 – Modalidade dos esquemas de RA das linhas de transmissão da RB - 2018 a 2022.	28
Tabela 4 – Desempenho e eficácia por modalidade de esquema de RA considerando indicador de atuações corretas.	29
Tabela 5 – Desempenho e eficácia por modalidade de esquema de RA considerando indicador de atuações satisfatórias.	29
Tabela 6 – Extensão linha de transmissão no SIN em 2023.	53
Tabela 7 – Variação das grandezas em função do comprimento da LT de 230 kV.	57
Tabela 8 – Variação das grandezas em função do comprimento da LT de 500 kV.	60
Tabela 9 – Variação das grandezas em função do comprimento e reatores da LT de 500 kV.	63
Tabela 10 – Variação das grandezas em função do reator de neutro da LT de 500 kV.	66
Tabela 11 – Variação das grandezas em função do comprimento da LPNE de 500 kV.	70
Tabela 12 – Variação das grandezas em função do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.	73
Tabela 13 – Variação das grandezas em função do reator de neutro da LPNE de 500 kV.	76
Tabela 14 – Variação das grandezas em função da porcentagem das estruturas autoportantes na LPNE de 500 kV.	80
Tabela 15 – Coordenadas dos cabos na torre típica de 230 kV.	90
Tabela 16 – Coordenadas dos cabos na torre típica de 500 kV.	92
Tabela 17 – Coordenadas dos cabos na torre típica da LPNE de 500 kV	95
Tabela 18 – Coordenadas dos cabos na torre típica autoportante da LPNE de 500 kV.	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transients Program
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
LPNE	Linha de Potência Natural Elevada
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
PB	Projeto Básico
PR	Procedimentos de Rede
RA	Religamento Automático
RB	Rede Básica
RAM	Religamento Automático Monopolar
RAT	Religamento Automático Tripolar
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIL	Surge Impedance Loading
SIN	Sistema Interligado Nacional
TRT	Tensão de Reestabelecimento Transitória

LISTA DE SÍMBOLOS

g_c	Condutância do arco, modelo Cassie
g_m	Condutância do arco, modelo Mayr
τ_c	Constante de tempo do arco, modelo Cassie
τ_m	Constante de tempo do arco, modelo Mayr
u	Tensão do arco, modelo Cassie
u_0	Tensão constante do arco, modelo Cassie
i_m	Corrente do arco, modelo Mayr
P_0	Potência de resfriamento do arco, modelo Mayr
I_{arc}^{mag}	Corrente de arco secundário - acoplamento eletromagnético
I_{arc}^{est}	Corrente de arco secundário - acoplamento eletrostático
I_{arc}	Corrente de arco secundário
V_p^{mag}	TRT - acoplamento eletromagnético
V_p^{est}	TRT - acoplamento eletrostático
V_p	Primeiro pico de TRT
C'_1	Capacitância de sequência positiva
C'_0	Capacitância de sequência zero
L'_1	Indutância de sequência positiva
L'_0	Indutância de sequência zero
X'_0	Reatância de sequência zero do reator
X'_1	Reatância de sequência positiva do reator
V_m	Tensão fase fase do sistema
ω	Frequência do sistema
λ	Comprimento de onda
l	Comprimento da linha
β	Grau de compensação da linha
x	Distância entre a falta e o início da linha
V_{fa}	Tensão induzida na fase aberta
V_{rn}	Tensão induzida nos reatores de neutro
r^{pos}	Resistência de sequência positiva da linha
x^{pos}	Reatância de sequência positiva da linha
b^{pos}	Susceptância de sequência positiva da linha
V_b	Tensão base da linha
p	Percentual de compensação projetado da linha
Y'	Admitância transversal da linha
Z_c	Impedância característica da linha
γ	Constante de propagação da linha
Q_{RT}	Potência dos reatores da linha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.4	CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	23
1.5	PUBLICAÇÕES DECORRENTES	23
1.6	ESTRUTURAÇÃO	23
2	RELIGAMENTO AUTOMÁTICO MONOPOLAR	25
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
2.2	CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO E PRIMEIRO PICO DE TRT	30
2.3	CRITÉRIOS VIGENTES NOS PROCEDIMENTOS DE REDE	35
2.4	MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO	37
2.4.1	Utilização do reator de neutro em linhas compensadas	38
2.4.2	Chaves de aterramento rápido	39
2.5	MODELAGEM DA REDE PARA ESTUDOS DO RAM	39
2.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	41
3	AUTOMATIZAÇÃO DAS ANÁLISES VIA PYTHON E ATP	43
3.1	ALTERAÇÃO DOS REATORES EM DERIVAÇÃO E DE NEUTRO	46
3.2	ALTERAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA	47
3.3	ALTERAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA E DOS REATORES	51
3.4	ALTERAÇÃO DA ESTRUTURA DE TORRE TÍPICA PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS	52
3.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	52
4	ESTUDOS DE CASO EM ESTRUTURAS TÍPICAS DO SIN	53
4.1	DIRETRIZES PARA AS SIMULAÇÕES E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	53
4.2	ANÁLISE CONSIDERANDO SILHUETA TÍPICA DE 230 kV	55
4.3	ANÁLISE CONSIDERANDO SILHUETA TÍPICA DE 500 kV	57
4.3.1	Análises considerando a variação do comprimento da LT de 500 kV	59
4.3.2	Análises considerando a variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV	61
4.3.3	Análises considerando a variação do reator de neutro da LT 500 kV	64
4.4	ANÁLISE CONSIDERANDO SILHUETA TÍPICA DA LPNE DE 500 kV	67

4.4.1	Análises considerando a variação do comprimento da LPNE de 500 kV	68
4.4.2	Análises considerando a variação do comprimento e reatores da LPNE de 500kV	71
4.4.3	Análises considerando a variação do reator de neutro da LPNE de 500 kV	73
4.4.4	Análises considerando a utilização das estruturas autoportantes na LPNE de 500 kV	76
4.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	79
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.1	CONCLUSÕES	81
5.2	TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – Parâmetros considerados na modelagem das estruturas utilizadas nas simulações	88
	APÊNDICE B – Rotina de automatização do Python para alteração do reator de neutro	100

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho está inserido no âmbito de pesquisas e análises relacionadas aos estudos de viabilidade do Religamento Automático Monopolar (RAM) na etapa de Projeto Básico (PB), aos impactos das variações sistêmicas nessa manobra e a busca de soluções para minimizar a corrente de arco secundário. Neste capítulo, serão abordados a contextualização, as principais motivações, os objetivos e a estrutura deste trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) do Brasil é planejando e implantado para otimizar os potenciais de geração de energia presentes de forma diversificada em todas as regiões que, por sua vez, possuem características de sazonalidade complementares. Desse modo, o sistema de transmissão conecta, por exemplo, as grandes usinas de geração hidráulica do Norte e os parques eólicos do Nordeste aos grandes centros consumidores de carga nas regiões Sudeste e Sul do país.

No Brasil, o planejamento da expansão do SEP é realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) cujo objetivo é buscar a melhor solução técnico-econômica para atender às necessidades sistêmicas eletroenergéticas. A partir das soluções propostas, o Ministério de Minas e Energia (MME) consolida as novas obras que comporão os leilões de transmissão com processo regulatório estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Desde o planejamento até a construção das instalações, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apoia em diversas etapas como, por exemplo, nas definições dos requisitos técnicos editalícios, na avaliação do projeto básico, na verificação da conformidade das instalações como implantadas em campo, na elaboração dos estudos pré-operacionais etc. Neste processo, após realizado o leilão e assinado o contrato de concessão, a transmissora vencedora tem por obrigação contratual elaborar e submeter para avaliação do ONS o PB.

O PB consiste em um conjunto de documentos que englobam estudos e especificações técnicas das instalações. Estes têm o objetivo de dimensionar as características básicas das novas instalações atestando sua suportabilidade às solicitações elétricas e mecânicas durante sua vida útil operacional. O ONS avalia a conformidade do PB para assegurar o atendimento às diretrizes dos Procedimentos de Rede (PR), às normas técnicas vigentes, aos requisitos dos anexos técnicos dos leilões etc. Cabe ressaltar que após a aprovação do PB, mesmo se for identificada uma necessidade de alteração de algum elemento de projeto como, por exemplo, traçado da linha, características de equipamentos, configuração de subestações, em momentos posteriores a essa etapa, a Transmissora não terá permissão para realizá-la, mesmo que assumam todos os custos associados. No entanto, alterações excepcionais podem ser submetidas para deliberação da ANEEL.

Cada lote de transmissão detém características específicas que requer elaboração, tratamento e análise customizados do PB. Por exemplo, para empreendimentos com uma ou mais linha de transmissão aérea, solicita-se, dentre diversos outros estudos e especificações, a apresentação dos estudos de viabilidade do RAM. A utilização e o sucesso dessa manobra trazem benefícios operacionais e sistêmicos quando comparado ao Religamento Automático Tripolar (RAT) (GODOY et al., 2012). Dessa forma, no PB é imprescindível que a viabilidade do RAM seja analisada e, quando necessário, devem ser propostas soluções que maximizem a probabilidade de seu sucesso.

Conforme apresentado em (ONS, 2022b), cerca de 80% das ocorrências nos sistemas elétricos de potência correspondem a faltas fase-terra. Neste contexto, torna-se vantajoso para a operação do SEP adotar a prática do RAM, sempre que possível, devido aos seus benefícios. O RAM proporciona menores esforços torcionais nos eixos das máquinas, maior flexibilidade operativa e redução nas sobretensões transitórias durante o evento, diminui a intensidade e duração dos afundamentos de tensão, além de aumentar a margem de estabilidade eletromecânica. No entanto, o insucesso dessa manobra pode agravar a ocorrência, levando o sistema, por exemplo, à instabilidade eletromecânica. Dessa forma, analisar e buscar soluções que maximizem a operação bem-sucedida do RAM é imprescindível para a continuidade e confiabilidade da operação do SIN.

Após um curto-circuito monofásico em linha de transmissão, o sistema de proteção atuará para abrir os dois terminais da linha para extinguir a corrente de falta geralmente da ordem de alguns quilo amperes denominada como o arco primário. A partir desse momento, devido ao acoplamento eletromagnético da fase aberta com as fases sãs e/ou circuitos que porventura operam em paralelo, há a indução de uma corrente residual denominada corrente de arco secundário que usualmente está na ordem algumas dezenas de amperes. O sucesso do RAM está diretamente associado à extinção dessa corrente. Caso esta não seja extinta até o momento do religamento, a manobra restabelecerá a falta podendo agravar a perturbação. Neste pior cenário, o sistema de proteção abrirá as três fases para isolar a falta monofásica.

Atualmente, os critérios adotados para determinar a viabilidade de implantação do RAM estão associados à intensidade da corrente de arco secundário e ao valor do primeiro pico da tensão de reestabelecimento transitória (TRT) (ONS, 2022d). Há diversos fatores que impactam significativamente essas duas grandezas, tais como o comprimento da linha, o nível de tensão, o grau de compensação, topologia da torre, o valor do reator de neutro, quando aplicável etc. Neste contexto, conhecer os parâmetros mais influentes auxilia na busca e proposições de soluções que maximizem o sucesso dessa manobra. Além disso, essas análises podem indicar a necessidade de aquisição de equipamentos adicionais, evitar problemas graves de cunho operacional, influenciar na escolha de estruturas de linhas de transmissão, indicar a necessidade de aplicação de instruções de operação especiais a depender da configuração da rede elétrica da região etc.

Diante do exposto, conforme definido em (ONS, 2022d), todas as linhas de transmissão da rede básica devem possuir esquema de religamento monopolar automático e, portanto, estar preparadas para a manobra. No entanto, há diversas variáveis que podem limitar a viabilidade dessa operação. Quanto maior for a indução da corrente de arco secundário maior será o desafio para atender aos critérios vigentes de viabilidade do RAM. Linhas de tensão e comprimento elevados tendem a apresentar indução mais intensa do arco. Além disso, o planejamento tem adotado como solução para maximizar a capacidade de transmissão de energia a indicação e construção de Linhas de Potência Natural Elevada (LPNE). Essas linhas apresentam, devido à sua geometria compacta e ao alto acoplamento capacitivo associado, desafios significativos para implementação do religamento monopolar. Portanto, frente à complexidade e importância do tema, é evidente a necessidade de análises mais refinadas e aprofundadas para abordar este assunto como serão apresentadas no presente trabalho.

1.2 OBJETIVOS

O estudo de viabilidade do religamento monopolar é caracterizado por uma análise de transitórios eletromagnéticos que deve ser realizada através programas apropriados a este tipo de simulação como, por exemplo, ATP, PSCAD/EMTDC, EMTP-RV entre outros. Atualmente, a grande maioria dos estudos de PB submetidos à análise do ONS são realizados utilizando o ATP por ser de código aberto e pela consistência nos resultados. Dessa forma, este será o programa adotado para se efetuar as simulações do presente trabalho.

Esse trabalho tem como principal motivação apresentar uma metodologia baseada na utilização de algoritmos implementados em Python para gerenciar as simulações no ATP. A metodologia permitirá automatizar a alteração dos arquivos de simulação, realizar a execução do ATP para o arquivo .ATP alterado, interpretar as curvas transitórias e armazenar os resultados de interesse para a análise de viabilidade do RAM. A partir da metodologia apresentada, foram analisados os impactos das variações sistêmicas nas grandezas elétricas monitoradas na manobra: corrente de arco secundário, primeiro pico de TRT, tensão induzida na fase aberta e tensão induzida nos reatores de neutro quando aplicáveis. Foram estudadas variações sistêmicas para diferentes silhuetas típicas empregadas nas linhas do SIN. Desse modo, as configurações dos estudos de caso definidos em cada simulação estão descritas a seguir.

- Variações sistêmicas
 - Alteração do comprimento da linha;
 - Alteração do comprimento da linha mantendo-se o percentual de compensação fixo;

- Alteração do valor dos reatores de neutro;
 - Alteração na estrutura típica considerada para a linha.
- Tipos de estrutura típica de linha consideradas
 - Estrutura monomastro estaiada (vela) para uma linha de 230 kV, vide Figura 42;
 - Estrutura monomastro estaiada (cara de gato) para uma linha de 500 kV, vide Figura 44;
 - Estrutura *cross rope* para uma linha de 500 kV, vide Figura 46;
 - Estrutura autoportante (cara de gato) para uma linha de 500 kV, vide Figura 48.

Por meio da avaliação dos múltiplos cenários apresentados, foi possível realizar uma análise de sensibilidade comparativa que permite identificar de forma direta as principais influências das variações sistêmicas nas grandezas consideradas nos critérios que determinam a viabilidade do RAM. Com base nos resultados obtidos, torna-se possível aprimorar as análises na busca de soluções que potencializam o cumprimento dos critérios e otimizam o processo de especificação da linha e equipamentos associados para implementação da manobra.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, o RAM é uma manobra amplamente empregada nos sistemas. Um dos primeiros registros da implantação dessa manobra ocorreu em 1941 no Estados Unidos da América em uma linha de tensão nominal de 132 kV e 93 km de comprimento (TRAINOR; PARKS, 1947). Na ocasião, antes de religar a fase aberta foi introduzido um atraso (tempo morto) para maximizar a extinção do arco secundário e a deionização do ar. Devido ao nível de tensão e ao pequeno comprimento da linha, há pouco acoplamento entre as fases implicando menor indução do arco secundário e, conseqüentemente, maior probabilidade de sucesso da manobra. Nos três primeiros anos, foram detectadas 42 faltas monofásicas nas quais 38 ocorrências obtiveram sucesso no RAM.

Com a expansão dos sistemas de transmissão e a elevação dos níveis de tensão utilizados, o sucesso da implementação do RAM passou a ser mais desafiador. Boisseau, Wyman e Skeats (1949) apresentam uma avaliação a partir de testes realizados em laboratório acerca do tempo de deionização do ar após a ocorrência da falha nas cadeias de isoladores em linhas de 230 kV. Estes testes tiveram como objetivo determinar o tempo necessário para a extinção do arco secundário. Para simular o acoplamento capacitivo, foram introduzidos capacitores nos estudos de forma a representarem uma linha real com comprimento variando de 160 a 480 km. Conforme o comprimento e, conseqüentemente, o acoplamento, aumentava, o tempo necessário para extinção do arco secundário se tornava maior.

Em (NGAMSANROAJ; PREMRUDEEPREECHACHARN, 2007) são apresentadas análises de RAM em uma linha de 500 kV da Tailândia com 325,6 km. Como critério de viabilidade, neste trabalho considerou-se que para empregar um tempo morto de 500 ms a intensidade da corrente de arco secundário não poderia ultrapassar 30 A e a taxa de crescimento da TRT deveria ficar limitada a 10 kV/ms. A partir dessas considerações, o artigo buscou apresentar a importância do dimensionamento ótimo da compensação e reatores de neutro para que o sistema atendesse aos requisitos supracitados e, conseqüentemente, aumente a probabilidade de sucesso da manobra.

O trabalho apresentado em (BABU; RAMESH, 2012) realizou estudos em uma linha de 400 kV e teve como principal objetivo obter e validar um modelo robusto do arco primário e secundário. As simulações foram executadas considerando o comportamento do arco como uma resistência variável no tempo. Além disso, buscou-se otimizar o reator de neutro nos bancos de reatores de compensação em derivação conectados à linha para reduzir a corrente de arco secundário e o primeiro pico da TRT, conforme apresentado nos resultados no trabalho.

Em (ABBASI; SEYEDI; STRUNZ, 2009), um novo método de simulação no ATP para RAM é apresentado com foco nas sobretensões originadas dessa manobra. O trabalho em referência realizou as simulações considerando duas linhas de transmissão reais de 400 kV. Os detalhes da modelagem do sistema da rede são descritos e os efeitos no RAM em função do comprimento da linha de transmissão, bem como o número de circuitos, são analisados. Os impactos do tempo morto no RAM e nas sobretensões também são estudados. Por fim, as diferenças entre o religamento automático monopolar em todas as fases devido à posição dos condutores também são apresentadas. Como resultados, o trabalho demonstrou que, para linhas de circuito duplo, as sobretensões podem atingir valores muito altos mesmo para comprimentos curtos da linha. Além disso, foi possível constatar que as sobretensões máximas na fase mais próxima ao solo são menores comparadas as demais.

Com a evolução e recursos dos relés digitais, estão sendo estudados métodos de religamento monopolar adaptativo. Essa estratégia objetiva identificar a natureza da falta e o momento de extinção do arco secundário através de análises nos sinais monitorados, permitindo um religamento bem-sucedido no menor tempo possível e evitando os problemas associados ao método tradicional de RAM. Em (NIKOOFEKR; SADEH, 2018) é proposto um algoritmo baseado no conteúdo harmônico para detectar o momento de extinção do arco secundário. No algoritmo proposto, utiliza-se a transformada TT, tempo-tempo, baseada em um método que divide uma série temporal primária em um conjunto de séries temporais secundárias para realçar as harmônicas das tensões das fases sãs. O critério para a detecção da extinção do arco secundário são as amplitudes das harmônicas, que são calculadas após a transformada TT. Para avaliar a precisão do esquema proposto, são realizadas inúmeras simulações em diferentes condições, incluindo localização da falha,

ângulo de início da falha e compensação da linha. Os resultados apresentados indicam a eficácia do método tanto para a identificação da falta como para a determinação do tempo para o religamento.

Em (KHODADADI; NOORI; SHAHRTASH, 2013), o algoritmo proposto aplica o método adaptativo baseado na variação de amplitude dos sinais de tensão local do barramento para identificar a ocorrência dos três eventos sucessivos durante uma falha: início da falha, abertura do disjuntor (extinção do arco primário) e extinção do arco secundário; a detecção do último evento permite o religamento do disjuntor. Com base no fato de que os dois primeiros eventos resultam em quedas abruptas na amplitude da tensão local e o terceiro impõe um aumento abrupto, essa sequência de mudanças na amplitude de tensão distingue falhas temporárias. Para avaliar a robustez do esquema proposto em relação a falhas transitórias, são apresentados os resultados de análises sob diferentes condições, incluindo localização da falha, quantidade de carga, direção do fluxo de energia e níveis de curto-circuito dos barramentos locais e remotos. Todos os resultados mostraram que o algoritmo proposto é confiável e robusto na identificação dos três eventos sucessivos durante a falta.

Em (AHN et al., 2001) é proposto um algoritmo com capacidade de detectar as características distintas das formas de onda de tensão no ponto de medição e determina com precisão se uma falha é transitória ou permanente. No caso de uma falha transitória, o algoritmo também identifica o tempo morto para extinguir o arco secundário. A partir dessas premissas, o algoritmo é validado por meio de estudos de caso no sistema coreano de 765 kV. Os resultados desses estudos demonstram que a análise e o algoritmo desenvolvido são precisos e eficazes em diversas localizações de falhas. O esquema proposto pode resultar em uma alta taxa de religamentos bem-sucedidos, adaptando-se aos tempos mortos variáveis. A implementação do algoritmo de controle de tempo morto variável é simples e requer apenas informações sobre os transientes de tensão nas extremidades da linha. Dessa forma, ele pode ser incorporado, por exemplo, a um *hardware* de relé de religamento digital existente.

Um método de RAM adaptativo alternativo ao que utiliza harmônicos de tensão e corrente é proposto em (SAHOO; SAMANTARAY, 2018). O processo do RAM pode ser afetado em sistemas que possuem uma grande quantidade de parques eólicos, os quais são muito sensíveis a perturbações na rede elétrica. O trabalho em referência, propõe uma técnica baseada em casos de falhas de fase-terra em uma linha de transmissão compensada por capacitores série controlado por tiristor conectada a um parque eólico. A técnica apresentada utiliza a soma acumulada da energia calculada a partir de coeficientes de onda que possibilita distinguir as faltas permanentes das transitórias. Além disso, o arco secundário também é monitorado para identificar sua extinção. Esse parâmetro é utilizado para ajustar o tempo morto do religador e, assim, evitar o religamento ainda na presença da falta. A avaliação do desempenho do esquema proposto é realizada na plataforma

de um simulador digital em tempo real. Os resultados mostraram que o desempenho da técnica proposta é quase independente de grandes variações nos parâmetros da falta apresentando desempenho superior às técnicas convencionais.

Os impactos do arco secundário no tempo morto em uma linha de extra alta tensão são abordados em (DUDURYCH; GALLAGHER; ROSOLOWSKI, 2004). O tempo morto do RAM é investigado com base nos modelos de arco primário e secundário incorporado ao programa de transitórios eletromagnéticos. A validade dos modelos usados é comprovada por comparação com resultados de testes de campo em uma linha de transmissão de energia real de 1150 kV de Ekibastuz para Kokchetav no norte do Cazaquistão.

Em (THOMANN; LAMBERT; PHALOPRAKARN, 1993) é apresentada a otimização dos reatores de compensação para implementação de religamento monopolar em linhas de circuito duplo em sistema de extra alta tensão. No entanto, para algumas aplicações, os esquemas ideais podem não ser práticos devido a restrições como tamanho físico do reator, restrições operacionais e equipamentos existentes. Os estudos de caso foram realizados considerando uma linha de circuito duplo com extensão de 328 km de 500 kV localizada na Tailândia. Vários esquemas de compensação foram considerados e seu desempenho foi examinado com ambos os circuitos em operação e com um circuito fora. A análise indicou que determinar o valor ótimo para o reator traz grandes benefícios para o RAM.

A operação de esquemas de religamento integrado é discutida em (ADLY; SEHI-EMY; ABDELAZIZ, 2017). Essa abordagem é baseada na fusão das vantagens funcionais da técnica de religamento adaptativo e da técnica de religamento ótimo. O RAM adaptativo identifica a natureza da falha, transitória ou permanente, e determina o tempo morto para o religamento a partir de análise, por exemplo, nos sinais de tensão. O RAM ótimo é dependente do ângulo de carga dos geradores e minimiza a oscilação do sistema. Os estudos de caso para a técnica proposta são realizados com sucesso em diferentes cenários de curto-circuito que envolvem vários locais de falha, ângulos de início e representação das características do arco secundário. Além disso, a capacidade do esquema proposto é confirmada considerando os efeitos de compensadores em derivação. Os resultados das simulações indicam que o método de religamento proposto pode aumentar a estabilidade transitória do sistema.

Desde o início dos estudos e utilização do religamento monopolar, um dos grandes desafios é determinar o tempo morto necessário para que a manobra tenha sucesso. Neste contexto, a aplicabilidade do RAM e o tempo morto foram discutidos a partir de testes em campo e em laboratórios, conforme apresentado em (SCHAER; BALTENSBERGER, 1956; MILNE, 1963; WILCOX; HORE, 1962). No Brasil, conforme definido em (ONS, 2022d), busca-se projetar as novas instalações para possibilitar a operação do RAM com tempo morto de 500 ms. Caso não seja possível atingir tecnicamente esse tempo, devem ser avaliadas as implicações no comportamento dinâmico do sistema advindas da necessidade

de operar com tempo morto mais elevado.

1.4 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A principal contribuição deste trabalho é a apresentação da metodologia que permitiu a integração do Python para gerenciar e simular múltiplos cenários no ATP de forma automática. Essa metodologia simplifica as análises de sensibilidade e na busca de soluções para a viabilidade do RAM. Dentre as variações sistêmicas apresentadas, destaca-se a possibilidade de representar com maior fidedignidade as diferentes estruturas de uma linha real e seus possíveis impactos na presente análise de transitórios.

Em relação aos resultados, estes são apresentados de forma gráfica considerando os critérios vigentes para implementação do RAM para cada linha e estrutura típica analisada. Desse modo, esses dados podem ser utilizados como indicativo inicial para linhas com características semelhantes.

1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES

1. J. C. F. Martins, I. D. Metzker, M. A. Tomim and P. G. Barbosa. Analysis of the impacts of systemic variations in the secondary arc current using Python and ATP. XIV LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2022.
2. I. D. Metzker, J. C. F. Martins. Automatização da variação de parâmetros de linha de transmissão e seus impactos no religamento monopolar. XIX ERIAC DÉCIMO NONO ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE - 2023.

1.6 ESTRUTURAÇÃO

O presente Capítulo 1 apresenta uma abordagem introdutória, buscando fornecer uma visão geral sobre o processo de especificação das novas instalações que se integram ao SIN e a importância dos estudos de viabilidade do RAM nesta etapa. Dessa forma, foram abordados conceitos que impactam no RAM e a necessidade de análises com maiores detalhes que balizaram os objetivos apresentados.

No Capítulo 2 são apresentadas as estatísticas associadas as ocorrências que de curtos-circuitos no SIN e a importância da utilização do RAM. Mostra-se também os conceitos mais específicos dessa manobra juntamente com os critérios vigentes que determinam sua viabilidade bem como as definições de corrente de arco secundário e primeiro pico de TRT. Além disso, o capítulo apresenta soluções empregadas para maximização a probabilidade de sucesso da manobra.

A metodologia utilizada para gerenciar, executar e interpretar os resultados das simulações no ATP através de algoritmos em Python é explorada no Capítulo 3. São apresentados os conceitos da estruturação dos parâmetros da rede nos cartões de dados e como realizar as alterações de parâmetros no cartão principal e em sub-rotinas como o LCC quando se deseja alterar algum dado da linha de transmissão como, por exemplo, seu comprimento.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados para os estudos de caso. Para uma linha de 230 kV foram simulados os impactos nas análises do RAM frente à variação do comprimento da linha. Para as linhas de 500 kV, convencional e de potência natural elevada, foram apresentados resultados considerando a variação do comprimento da linha, a variação do comprimento da linha e dos reatores terminais para manter fixo o percentual de compensação e a variação do reator de neutro. Além disso, para a LPNE, foi apresentada a análise que considera a representação da linha com duas estruturas em sua extensão: *cross rope* e autoportante (cara de gato).

Por fim, no Capítulo 5 são listadas as conclusões finais da presente pesquisa e as propostas para trabalhos futuros.

2 RELIGAMENTO AUTOMÁTICO MONOPOLAR

O RAM é uma técnica utilizada em linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. Trata-se de um sistema automatizado que permite restabelecer a condução em uma linha após a ocorrência de uma falta monofásica momentânea, como um curto-circuito. A operação bem-sucedida dessa manobra traz robustez e flexibilidade operacional para os SEP. No entanto, é importante destacar que no SIN o RAM deve ser especificado e utilizado considerando os critérios de viabilidade vigentes nos Procedimentos de Rede para garantir a segurança operativa do sistema. Em casos de faltas persistentes ou quando o RAM falha, torna-se necessário que o sistema de proteção atue para eliminar a falta e minimizar os impactos da perturbação.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As linhas de transmissão do SIN estão sujeitas as mais diversas interferências: descargas atmosféricas, queimadas, vento, animais, vandalismo etc. Dessa forma, há vários incidentes todos os anos que levam ao desligamento forçado dessas linhas. De maneira geral, as faltas podem ser classificadas em permanentes e temporárias. As permanentes, como por exemplo o rompimento de uma cadeia de isoladores, necessitam de intervenção humana e manutenção para eliminar a causa e possibilitar nova energização do circuito. Já as temporárias são extintas naturalmente logo após as operações de manobra. Adicionalmente, os desligamentos também são classificados quanto sua natureza elétrica, como: falta monofásica para terra, bifásica, bifásica para terra, trifásica e trifásica para terra.

As definições supracitadas são importantes para a caracterização das perturbações e constam no levantamento estatístico das ocorrências em linha de transmissão presente no relatório de análises estatísticas de desligamentos forçados elaborado pelo ONS (ONS, 2022b). Esse relatório apresenta que no ano de 2021, 83,9% das faltas em linhas de corrente alternada (CA) com tensão igual ou superior a 230 kV foram monofásicas para terra. Objetivando um maior detalhamento, a Tabela 1 resume o percentual dos curtos-circuitos no SIN discriminados por sua natureza elétrica e por nível de tensão da linha para o ano de 2021. A partir destas métricas, observa-se que para os níveis de tensão de 500 kV e 230 kV a ocorrência dos curtos-circuitos monofásicos para terra representou 83,4% e 82,6% dos registros, respectivamente.

Ainda em relação ao relatório apresentado em (ONS, 2022b), são abordadas de maneira mais ampla as estatísticas dos últimos cinco anos em relação a sua publicação. Os dados da Figura 1 mostram que o percentual de faltas fase terra é superior a 80% em todos os anos da janela entre 2017 e 2021. Essa informação justifica a frequência dos curtos-circuitos monofásicos e a relevância da utilização do RAM para continuidade,

Tabela 1 – Natureza elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão em 2021.

Tensão [kV]	Fase Terra	Bifásica	Trifásica	Bifásica Terra	Trifásica Terra	Demais
765	92,9 %	7,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
500	83,4 %	13,4 %	0,2 %	1,6 %	0,0 %	1,4 %
440	95,9 %	3,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,1 %
345	91,8 %	5,4 %	0,0 %	0,8 %	0,0 %	2,0 %
230	82,6 %	9,4 %	1,2 %	4,8 %	0,3 %	1,7 %
Total	83,9 %	9,6 %	0,5 %	2,5 %	0,1 %	3,4 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 1 – Natureza elétrica dos desligamentos das linhas de transmissão entre 2017 e 2021.



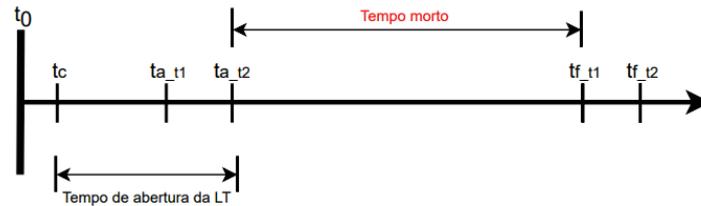
Fonte: ONS (2022b).

confiabilidade e flexibilidade do suprimento de energia e da operação do SIN.

Os Religamentos Automáticos (RA) são empregados para reduzir os tempos de interrupção na transmissão de energia e acelerar o processo de recomposição do sistema. Para exemplificação, a Figura 2 detalha os eventos desta manobra: dada uma perturbação em uma linha de transmissão no instante t_c , o sistema de proteção identificará a falta e enviará um comando para o disjuntor mais próximo abrir em t_{a_t1} e, em seguida, o disjuntor da extremidade oposta também será aberto no tempo t_{a_t2} para isolar o curto-circuito. O intervalo de tempo entre a ocorrência e a abertura do segundo disjuntor é definido como tempo de abertura da linha. Após a abertura, espera-se um tempo denominado morto para que toda a corrente da falta seja extinta para se iniciar o religamento através do fechando do primeiro disjuntor em t_{f_t1} e do segundo em t_{f_t2} .

Dentre as definições supramencionadas, o tempo morto é a variável mais importante nessa sequência, pois sua definição influenciará diretamente o sucesso da manobra bem como em suas vantagens. De acordo com (AQUINO; MASSAUD; GONÇALVES, 2009),

Figura 2 – Eventos no RA.



Fonte: Adaptado de (CARDOSO, 2018).

quanto maior o tempo morto, maior a probabilidade de extinção total da corrente de falta e, conseqüentemente, de sucesso do RA. No entanto, aumentar demasiadamente este tempo pode reduzir as vantagens dessa operação.

Em relação à utilização dos RA no SIN, no final de 2022, registrou-se um quantitativo de 1250 linhas de transmissão da Rede Básica (RB) com o esquema de religamento automático ativado. Esse número corresponde a 87,6% do total de linhas de transmissão da RB em operação na mesma data, que era de 1427. A Tabela 2 mostra o total de linhas de transmissão da Rede Básica (RB) e o total de linhas de transmissão da RB com o esquema de religamento automático ativado RA considerando o período de 2018 a 2022. Em 2022, os elos de Corrente Contínua (CC) em 600 e 800 kV operaram com o religamento automático (*restart* do elo CC) ativado (ONS, 2023).

Tabela 2 – Esquemas de RA das linhas de transmissão da RB por nível de tensão - 2018 a 2022.

Tensão [kV]	2018		2019		2020		2021		2022	
	RB	RA	RB	RA	RB	RA	RB	RA	RB	RA
800	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4
750	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
600	4	3	4	3	4	3	3	3	4	3
500	262	242	282	261	301	280	340	316	369	343
440	58	56	59	57	60	57	64	63	65	62
345	127	98	129	99	131	99	134	101	136	105
230	682	581	714	607	747	638	785	681	842	726
138	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Total	114	990	1199	1038	1254	1088	1337	1175	1427	1250

Fonte: Adaptado de (ONS, 2023).

Os RA podem ser realizados das seguintes formas: monopolar, tripolar ou monopolar/tripolar. A modalidade monopolar/tripolar oferece a capacidade simultânea de religamento monopolar e tripolar. Nessa situação, o esquema de religamento automático

seleciona a modalidade monopolar para faltas monofásicas e a modalidade tripolar para qualquer outro tipo de defeito que envolva mais de uma fase (ONS, 2023). A definição de qual RA empregar vai depender das necessidades e características sistêmicas associadas à linha. A Tabela 3 apresenta as linhas de transmissão da RB com esquema de religamento automático ativo por modalidade considerando, também, o total apurado no final de cada ano, no período de 2018 a 2022.

Tabela 3 – Modalidade dos esquemas de RA das linhas de transmissão da RB - 2018 a 2022.

Modalidade	2018		2019		2020		2021		2022	
	Total	[%]	Total	[%]	Total	[%]	Total	[%]	Total	[%]
Tripolar	810	81,8	848	81,7	893	82,1	968	82,4	1034	82,7
Monopolar	116	11,7	116	11,2	116	10,7	116	9,9	116	9,3
Mono-Tri	58	5,9	66	6,4	71	6,5	83	7,1	92	7,4
Restart Elo CC	6	0,6	8	0,8	8	0,7	8	0,7	8	0,6
Total	990	100	1038	100	1088	100	1175	100	1250	100

Fonte: Adaptado de (ONS, 2023).

Para quantificar o desempenho das atuações dos RA são definidos dois indicadores, conforme detalhado em (ONS, 2023). Considera-se correta a atuação quando o esquema é solicitado e desempenha sua função, dentro das faixas ajustadas, proporcionando o desempenho esperado de acordo com sua aplicação e nos tempos determinados. O esquema de RA é ativado em um terminal da linha de transmissão quando ocorre a atuação de uma proteção instantânea nesse terminal, a fim de eliminar faltas internas. Por exemplo, no caso em que o esquema de RA é solicitado, mas o restabelecimento do terminal não ocorre devido a condições sistêmicas desfavoráveis, como no caso de esquemas de religamento do tipo tripolar, reincidência do defeito, problemas relacionados aos disjuntores ou bloqueio por proteção, seja correto ou não, considera-se correta a atuação do esquema, uma vez que este se comportou conforme esperado e seu objetivo não foi alcançado devido a fatores externos.

Neste contexto, a Tabela 4 apresenta a relação de atuações corretas por tipo de RA para os anos entre 2018 e 2022. Por exemplo, no ano de 2018, os dados apresentam que o religamento automático tripolar e o *restart* dos elos de corrente contínua atuaram de forma correta em 93% e 100% das solicitações, respectivamente. O total mostrado na Tabela 4 considera as atuações corretas de todos os esquemas de RA ponderados pela sua utilização. Observa-se que o total se aproxima do religamento tripolar devido sua predominância frente aos demais, conforme dados apresentados na Tabela 3. Por fim, a última coluna mostra a média das atuações corretas considerando os anos entre 2018 e 2022.

Tabela 4 – Desempenho e eficácia por modalidade de esquema de RA considerando indicador de atuações corretas.

Causa	2018	2019	2020	2021	2022	2018 a 2022
Tripolar	93,0%	92,1%	92,4%	92,2%	91,9%	92,3%
Monopolar	91,8%	97,5%	95,2%	89,5%	92,3%	93,3%
Mono-Tri	96,7%	95,2%	96,7%	94,7%	94,9%	95,5%
Restart Elo CC	100,0%	96,7%	100,0%	100,0%	100,0%	99,3%
Total	93,2%	93,3%	93,5%	92,5%	89,7%	92,5%

Fonte: Adaptado de (ONS, 2023).

A segunda métrica está relacionada à eficácia da atuação do sistema. Considera-se satisfatória a atuação quando o RA consegue restabelecer com sucesso todos os terminais da linha de transmissão, mesmo que ocorra um novo desligamento imediatamente após a completa recomposição ou que esse restabelecimento seja resultado de uma atuação incorreta do esquema. A partir desse conceito, a Tabela 5 apresenta a relação de atuações satisfatórias por tipo de RA para os anos entre 2018 e 2022. Exemplificando, no ano de 2022, o esquema de religamento automático monopolar e o *restart* dos elos de corrente contínua tiveram atuação satisfatória em 78,2% e 83,8% das solicitações, respectivamente. O total, apresentado na última linha, considera as atuações satisfatórias de todos os RA ponderados pela sua utilização. Adicionalmente, a última coluna mostra a média das atuações satisfatórias para os anos em referência.

Tabela 5 – Desempenho e eficácia por modalidade de esquema de RA considerando indicador de atuações satisfatórias.

Causa	2018	2019	2020	2021	2022	2018 a 2022
Tripolar	78,7%	76,7%	77,4%	75,8%	77,7%	77,2%
Monopolar	75,4%	72,8%	72,9%	76,2%	78,2%	75,0%
Mono-Tri	83,6%	77,1%	79,7%	73,7%	72,0%	76,7%
Restart Elo CC	100,0%	66,7%	66,7%	56,8%	83,8%	68,6%
Total	78,7%	76,2%	77,1%	75,1%	74,7%	76,8%

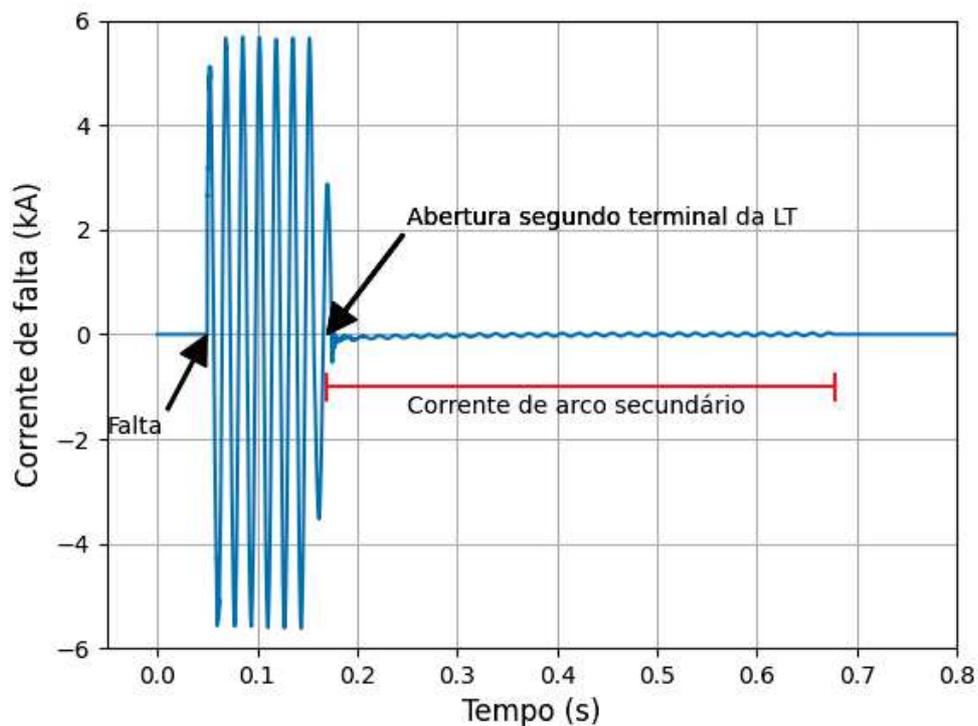
Fonte: Adaptado de (ONS, 2023).

Diante dos dados apresentados, verifica-se que os esquemas de RA atuam de atuaram de forma satisfatória em 76,8% das solicitações entre 2018 e 2022. Para os tipos envolvendo o RAM a atuação satisfatória atingiu 75%.

2.2 CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO E PRIMEIRO PICO DE TRT

Nos sistemas elétricos de potência, durante a ocorrência de um curto-circuito monofásico, surge uma corrente geralmente da ordem de quilo amperes que é alimentada pelas fontes do sistema, definida como corrente de arco primário. A fim de proteger o sistema elétrico, os disjuntores terminais da linha associados à fase em falta são abertos para isolar o defeito. No entanto, devido ao acoplamento eletromagnético entre a fase aberta e/ou de circuitos que operam em paralelo com as fases sãs, permanece circulando pela falta uma corrente residual da ordem e alguns amperes, definida como a corrente de arco secundário. Para ilustrar essas grandezas, a Figura 3 apresenta o comportamento da corrente durante um curto-circuito monofásico e abertura da fase em falta.

Figura 3 – Comportamento da corrente durante a falta monofásica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Conforme apresentado em (SÁ, 2010), o arco pode ser definido como um plasma com alta temperatura e baixa resistividade elétrica que conduz corrente sob a influência de um campo elétrico. Além da corrente, define-se também a tensão do arco secundário que é praticamente proporcional ao seu comprimento. O comportamento e a modelagem de um arco são extremamente complexos. De forma sintetizada, este processo pode ser associado a variações bruscas na condutância do arco que após alguns ciclos não volta a crescer acentuadamente acarretando sua extinção.

Há diversos modelos matemáticos para representação do arco que geralmente são divididos em três categorias: modelos físicos, modelos tipo caixa preta e modelos empíricos (PESSOA; ACOSTA; TAVARES, 2020). Para representação em simulações, os modelos tipo caixa preta apresentam boa precisão em relação à interação do arco elétrico com o restante do circuito. Nessa categoria, destacam-se os modelos de Cassie e Mayr. O conceito de Cassie adota as seguintes premissas:

- Temperatura constante na direção radial;
- Resfriamento por convecção na direção axial;
- Área da seção transversal do arco variável.

Partindo das hipóteses anteriores, a modelagem do arco baseado em Cassie é apresentada por (2.1). Sendo a condutância do arco de Cassie representada por g_c , em siemens [S], a constante de tempo do arco por τ_c , em segundos [s], a tensão do arco elétrico por u e a tensão constante do arco em equilíbrio por u_0 , ambas em volt [V].

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{u_0^2} - 1 \right) \quad (2.1)$$

A modelagem de Mayr assume que o arco é resfriado exclusivamente pelo ar, isto é, a dissipação de energia ocorre por condução térmica adotando as seguintes premissas.

- Área da seção transversal do arco constante;
- Perdas de calor por condução no sentido axial;
- Potência retirada do arco constante.

A representação do arco por Mayr é apresentada por (2.2). Sendo a condutância do arco de Mayr representada por g_m , em siemens [S], a constante de tempo do arco por τ_m , em segundos [s], a tensão do arco elétrico por u , em volt [V], a corrente do arco elétrico por i_m , em ampere [A], e a potência de resfriamento do arco por P_0 , em watt [W].

$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u i_m}{P_0} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Para entender os conceitos que balizam os estudos de RAM apresentados no projeto básico é fundamental entender os conceitos básicos de extinção da corrente de arco secundário que pode ser dividida em duas partes: extinção térmica e dielétrica.

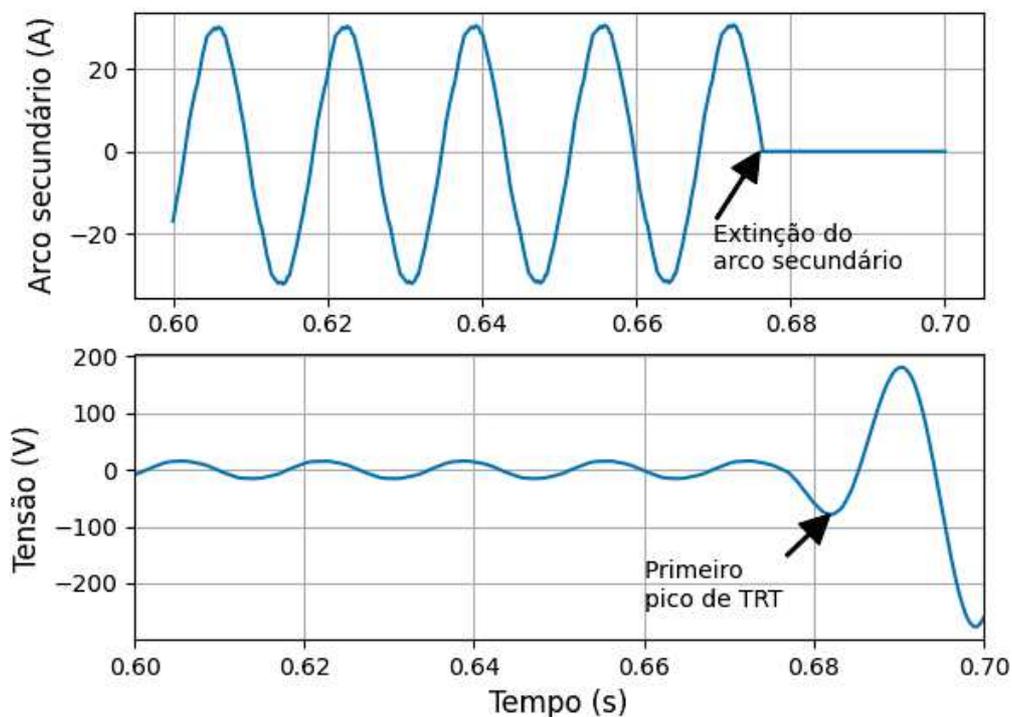
O comportamento do arco é não linear, atuando como resistência ou condutância. Durante períodos de alto fluxo de corrente, esta condutância tem um valor alto, mas para valores de correntes próximos de zero, seu valor diminui, facilitando a interrupção. No

entanto, mesmo quando a corrente é zero, ainda há cargas entre as extremidades do arco e o valor da condutância residual é baixo, mas não zero, resultando em uma pequena magnitude da corrente definida como corrente de pós-arco. Dessa forma, se esta corrente possuir valores muito baixos, a potência dissipada não será suficiente para reiniciar a descarga elétrica ocorrendo, então, a extinção térmica. Por outro lado, se potência for suficiente para reacender o meio, ocorre a ionização térmica e o arco se reestabelece.

Ocorrendo o sucesso, a corrente pós-arco é extinta e o meio passará a ficar sujeito às solicitações dielétricas. Nesta fase, a capacidade dielétrica do meio não pode ser explicada pelas leis que regem os fenômenos térmicos ou dielétricos da interrupção de corrente. Para correntes de pequena magnitude, esta fase é muito curta e pode ser ignorada no caso de arco secundário.

Para exemplificação, em complemento à Figura 3, no momento de extinção do arco secundário, fim da fase térmica e início da fase dielétrica, a tensão no ponto de falta aumenta significativamente, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Tensão de reestabelecimento transitória (TRT).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nesta etapa, o sistema gera um campo elétrico que será aplicado sobre as cargas espaciais ainda presentes no início da fase dielétrica acelerando os elétrons livres restantes e fornecendo energia suficiente para aumentar a ionização de impacto do elétron. Se este

aumento não for suficiente para romper o dielétrico, ocorre a extinção dielétrica e o arco secundário é completamente extinto.

Diante do exposto, observa-se que a intensidade da corrente de arco secundário e o primeiro pico de TRT após a extinção do arco estão associados diretamente com sua extinção térmica e dielétrica, respectivamente. Dessa forma, como será mostrado na Seção 2.3, um dos critérios utilizados para determinar a viabilidade do RAM é baseado nestas duas grandezas.

Na literatura há diversas análises das características que exercem influência significativa sobre a corrente de arco secundário e a tensão de reestabelecimento após a extinção. A corrente de arco secundário pode ser dividida em duas componentes, a primeira induzida pelo acoplamento eletrostático e a segunda pelo acoplamento eletromagnético entre a fase aberta e as fases e circuitos que porventura operam em paralelo. Em (HAUBRISH, 1974; CARDOSO, 2018) há uma representação dos efeitos dos acoplamentos eletromagnéticos (representado pelo índice *mag*) e eletrostático (representado pelo índice *est*) tanto para a corrente de arco secundário I_{arc}^{mag} e I_{arc}^{est} quanto para tensão de reestabelecimento V_p^{mag} e V_p^{est} . Nessa modelagem a resistência do arco será desconsiderada o que acarreta uma análise e resultados mais conservadores para análise de viabilidade do RAM.

Considerando C'_1 e C'_0 as capacitâncias de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, L'_1 e L'_0 as indutância de sequência positiva e zero por unidade de comprimento, ω sendo a frequência de operação, λ o comprimento de onda, l o comprimento da linha, V_m a tensão máxima entre fases do sistema, β o grau de compensação da linha, X_1 e X_0 as reatâncias de sequência positiva e zero dos reatores de compensação e x a distância entre o curto-circuito e o início da linha, define-se inicialmente as seguintes relações.

$$\beta_0 = 1 - \frac{C'_0}{C'_1} \quad (2.3a)$$

$$I_{arc} = I_{arc}^{mag} + I_{arc}^{est} \quad (2.3b)$$

$$V_p = V_p^{mag} + V_p^{est} \quad (2.3c)$$

Considerando a linha como um circuito simples sem a utilização reatores de compensação, têm-se as seguintes equações. Ressalta-se que na corrente de arco secundário

e na TRT foi adicionado sobrescrito *srt* para indicar linha não possui compensação.

$$I_{arcsrt}^{est} \approx \frac{1}{3}(C'_1 - C'_0)\omega l \frac{V_m}{\sqrt{3}}\beta_0 = 1 \quad (2.4a)$$

$$I_{arcsrt}^{mag} \approx \frac{1}{3}(2C'_1 - C'_0)\omega l^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l}\right) \left(\frac{\frac{L'_0}{L'_1} - 1}{2\frac{L'_0}{L'_1} + 1}\right) \frac{2\pi}{\lambda} \frac{V_m}{\sqrt{3}} \quad (2.4b)$$

$$V_{psrt}^{est} \approx \left(\frac{C'_1 - C'_0}{2C'_1 + C'_0}\right) \frac{V_m}{\sqrt{3}} \quad (2.4c)$$

$$V_{psrt}^{mag} \approx l \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l}\right) \left(\frac{\frac{L'_0}{L'_1} - 1}{2\frac{L'_0}{L'_1} + 1}\right) \frac{2\pi}{\lambda} \frac{V_m}{\sqrt{3}} \quad (2.4d)$$

De (2.4a) e (2.4b), verifica-se que a corrente de arco secundário calculada por (2.3b) é diretamente proporcional à tensão máxima entre fases da linha V_m . Dessa forma, quanto maior o nível de tensão do sistema maior será a corrente de arco secundário. Além disso, a capacitância de sequência positiva C_1 e o comprimento da linha l também contribuem para a elevação da corrente.

A tensão de reestabelecimento transitória, calculada por (2.3c) a partir de (2.4c) e (2.4d), também influencia diretamente a tensão máxima entre fases V_m .

Para uma linha de circuito simples considerando a utilização reatores de compensação sem reatores de neutro, têm-se as seguintes relações.

$$\frac{I_{arc}^{est}}{I_{arcsrt}^{est}} \approx \left(1 - \frac{\beta}{\beta_0}\right) \left(1 - \frac{X_1}{X_0}\right) \quad (2.5a)$$

$$\frac{I_{arc}^{mag}}{I_{arcsrt}^{mag}} \approx \left(1 - \frac{\beta}{3 - \beta_0}\right) \left(2 + \frac{X_1}{X_0}\right) \quad (2.5b)$$

$$\frac{V_p^{est}}{V_{psrt}^{est}} \approx \frac{\left(1 - \frac{\beta}{\beta_0}\right) \left(1 - \frac{X_1}{X_0}\right)}{\left(1 - \frac{\beta}{3 - \beta_0}\right) \left(2 + \frac{X_1}{X_0}\right)} \quad (2.5c)$$

$$\frac{V_p^{mag}}{V_{psrt}^{mag}} \approx 1 \quad (2.5d)$$

Por fim, considerando uma linha de circuito simples com compensação e com reator

de neutro sintonizado para a condição $X_0(\beta - \beta_0) = X_1\beta$, têm-se as seguintes relações.

$$I_{arc}^{est} \approx 0 \quad (2.6a)$$

$$\frac{I_{arc}^{mag}}{I_{arcsrt}^{mag}} = \frac{1 - \beta}{1 - \frac{\beta_0}{3}} \quad (2.6b)$$

$$V_p^{est} \approx 0 \quad (2.6c)$$

$$\frac{V_p^{mag}}{V_{pstr}^{mag}} \approx 1 \quad (2.6d)$$

Para linhas com reatores, o grau de compensação β impacta diretamente na corrente de arco secundário como mostrado em (2.5a), (2.5b) e (2.6b). Quanto maior o grau de compensação menor será a corrente de arco secundário dada por (2.3c).

2.3 CRITÉRIOS VIGENTES NOS PROCEDIMENTOS DE REDE

Atualmente, conforme definido em (ONS, 2022c), os projetos básicos das novas instalações contendo linhas de transmissão devem realizar os estudos de RAM com as seguintes finalidades:

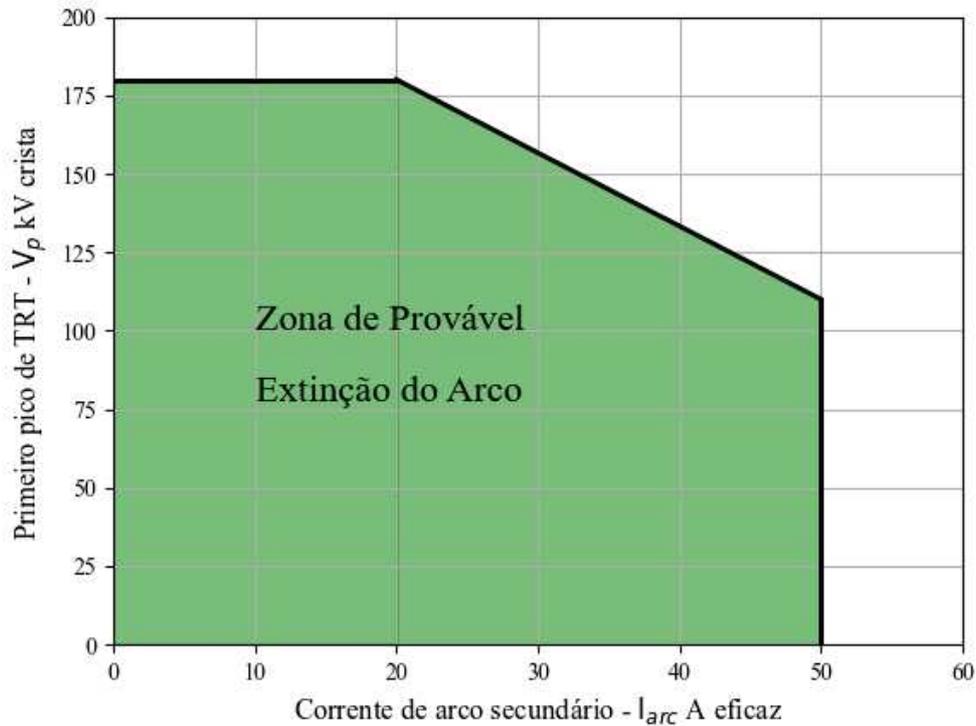
- Verificar a viabilidade da implementação do religamento monopolar na linha em análise, determinando o tempo morto mínimo para a manobra;
- Identificar a possibilidade da ocorrência de situações de ressonância, que podem ocorrer inclusive em função do grau de compensação da linha;
- Identificar a necessidade da utilização de reatores de neutro e/ou outros dispositivos de mitigação das correntes de arco secundário e subsidiar a sua especificação.

Em relação à viabilidade do RAM, as diretrizes dos Procedimentos de Rede estabelecem que se deve buscar soluções técnicas no sentido maximizar a probabilidade de sucesso da extinção do arco secundário em tempos inferiores a 500 ms. Para este tempo morto, o critério vigente é baseado no seguinte par de valores:

- Valor eficaz do último pico da corrente de arco secundário;
- Valor do primeiro pico da tensão de restabelecimento transitória estabelecida através do canal do arco extinto.

Esse método é baseado no trabalho apresentado em (BALOSSI; MALAGUTI; OSTANO, 1966). Segundo este critério, para a manobra ser considerada viável, o par de valores deve estar contido dentro de uma zona com alta probabilidade de extinção da corrente de arco secundário, conforme área destacada na Figura 5.

Figura 5 – Curva indicativa para análise da extinção da corrente de arco secundário.



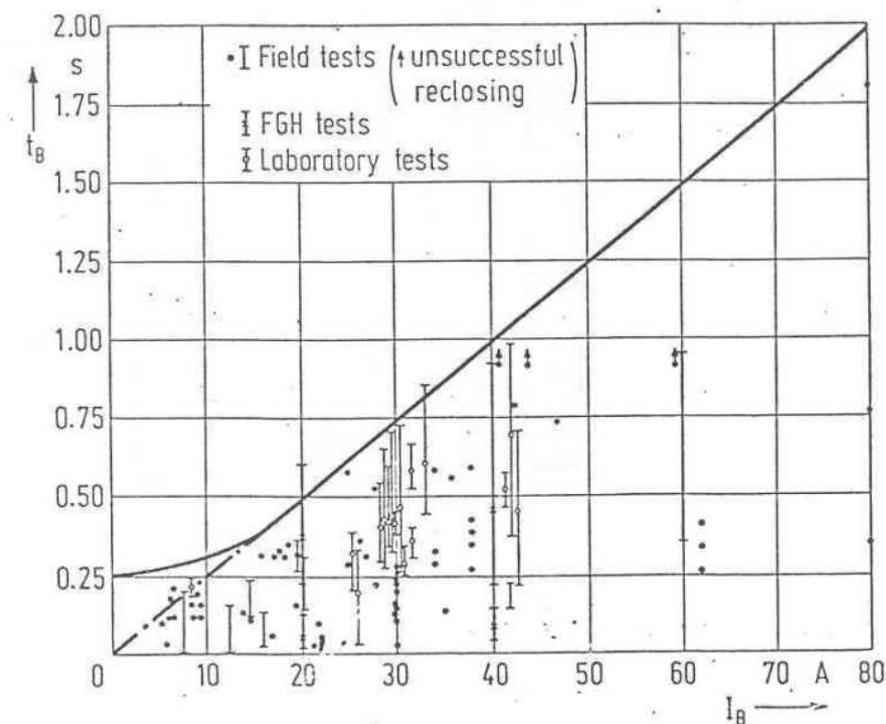
Fonte: Adaptado de (ONS, 2022c).

Caso as análises de viabilidade do RAM indiquem, por meio de resultados de simulações, a impossibilidade de atender aos requisitos em tempos inferiores a 500 ms, pode-se optar pela utilização do critério que se baseia em um tempo morto superior, definido neste trabalho como segundo critério. Nessa situação, deve-se utilizar a curva indicativa para análise da corrente de arco secundário apresentada na Figura 6 para a determinação do tempo morto a ser considerado. Este critério foi apresentado por (HAUBRISH, 1974) e considera uma forte influência da relação da tensão de restabelecimento transitória com o comprimento do arco. Dessa forma, pressupõe-se que o tempo morto pode ser definido apenas em função da magnitude da corrente de arco secundário.

Observa-se que esse critério não se aplica às correntes de arco secundário que excedam 80 A, para as quais a consequência prática é concluir que não é viável implementar o RAM devido à baixa possibilidade de extinção do arco.

Cabe ressaltar que caso seja necessária a utilização do segundo critério, devem ser realizados estudos adicionais para verificar os impactos do tempo morto adotado no comportamento dinâmico do sistema elétrico em análise.

Figura 6 – Curva indicativa para análise da extinção da corrente de arco secundário em função do tempo morto.



Fonte: ONS (2022c).

2.4 MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO

À medida que a utilização do RAM foi sendo difundida no sistemas elétricos de potência foram sendo estudados métodos para reduzir a corrente de arco secundário e permitir a realização da manobra adotando o menor tempo morto mínimo possível para garantir as vantagens dessa operação. No Brasil, em linha compensadas, utiliza-se a instalação de reatores de neutro como medida mitigadora do arco secundário. Essa metodologia também é explorada em (KIMBARK, 1964). Por sua vez, em (HAUBRISH, 1974), aborda-se a utilização de chaves de aterramento rápido instaladas nos terminais da linha de transmissão também com o objetivo de reduzir a corrente de arco secundário.

Nas últimas décadas, com a evolução e adoção dos relés digitais e melhor identificação das leituras dos sinais nos sistemas de potências, vem sendo estudadas técnicas de religamento monopolar adaptativo que se baseiam em informações, como: a localização da falta, o tempo de operação das proteções e as condições do sistema para tomar uma decisão mais precisa e segura acerca da realização ou não do RAM. Maiores detalhes sobre essas técnicas podem ser consultados em (MEHDI et al., 2021; SUONAN; SHAO; SONG, 2008; XIE et al., 2019).

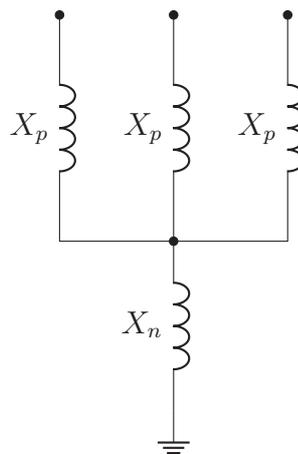
Em (SUN et al., 2017), apresenta-se estudos que utilizaram capacitores de equalização nas câmaras dos disjuntores para reduzir a intensidade da corrente de arco secundário.

Os resultados mostram que a existência dos capacitores melhora significativamente a probabilidade de extinção do arco. Neste contexto, o artigo busca determinar os valores ótimos dos capacitores que melhor atende às solicitações do arco secundário e da própria operação do disjuntor frente às ocorrências do sistema.

2.4.1 Utilização do reator de neutro em linhas compensadas

A utilização dos reatores de neutro é amplamente empregada para maximizar a probabilidade de sucesso do RAM. Geralmente, linhas longas e de tensões elevadas apresentam maiores acoplamentos capacitivos que induzem maiores correntes de arco secundário. No entanto, devido a outras necessidades sistêmicas como, por exemplo, controle de tensão em regime permanente e mitigação das sobretensões transitórias na energização, essas linhas geralmente são compensadas o quê possibilita empregar reatores de neutro em seus terminais. Enquanto os reatores de compensação são conectados entre cada fase e o ponto de neutro, o reator de neutro é conectado entre o ponto de neutro e o ponto de aterramento, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de ligação de reatores de neutro X_n .



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A utilização dos reatores de neutro para esse fim foi proposta em (KIMBARK, 1964). Um dos fatores com grande influência no arco secundário é a capacitância entre as fases. Dessa forma, o trabalho propõe compensar essa capacitância por uma reatância concentrada nos neutros dos reatores dos terminais da linha. Além disso, os reatores de neutro podem ser utilizados para deslocar possíveis picos de ressonâncias reduzindo sobretensões durante o RAM (DIAS, 2015).

Conforme apresentado em (ONS, 2022a), há um roteiro definido para a especificação do reator de neutro que oportunamente está reproduzido a seguir.

1. Primeiro, define-se o valor da reatância em função da necessidade de se adequar ao par de valores V_p e I_{arc} e as tensões induzidas na fase aberta durante o RAM;

2. Em seguida, determina-se a capacidade de condução da corrente de curta duração. Esta corrente é definida através das simulações em regime permanente considerando a falta monofásica. Recomenda-se adotar um valor 20 % superior ao simulado para acomodar possíveis evoluções no nível de curto-circuito;
3. Após as etapas supracitadas, especifica-se a corrente de regime permanente. Sugere-se adotar um valor da ordem de 15 % da corrente de curta duração.
4. Por fim, especifica-se o nível de isolamento do neutro do reator de linha. Geralmente, adota-se 72,5 kV. No entanto, nível de isolamento superior pode ser necessário para atender as solicitações sistêmicas.

2.4.2 Chaves de aterramento rápido

Outro método abordado na literatura para extinção do arco secundário são as chaves de aterramento rápido (GODA et al., 1993; ARAÚJO et al., 2019). Estes dispositivos, são utilizados para conectar um elemento carregado a terra com o objetivo de realizar a descarga elétrica. Essa abordagem é interessante para linhas que não possuem compensação e inviabiliza a utilização de reatores de neutro. Através da realização do aterramento da linha, maximiza-se a probabilidade de extinção do arco secundário, principalmente devido ao desvio de uma grande parcela da corrente que o alimentaria, via acoplamento capacitivo, para as chaves.

Embora seja uma solução promissora, o emprego das chaves de aterramento rápido estabelece um circuito que permite a circulação de correntes induzidas por acoplamento magnético entre a fase aberta e as fases sãs. A intensidade dessas correntes pode influenciar na duração do arco secundário, já que circulam através do ponto de falta. Cabe destacar que a intensidade dessas correntes depende principalmente do carregamento da linha, do local da falta, do comprimento da linha e do intervalo de tempo entre o fechamento subsequente das chaves de aterramento em cada extremidade da linha. Quanto maior o intervalo, maior será o tempo de extinção do arco secundário.

2.5 MODELAGEM DA REDE PARA ESTUDOS DO RAM

As instalações dos sistemas de potência operam na maior parte do tempo em condições de regime permanente, mas devem ser projetadas para suportar as maiores solicitações que possam surgir em sua operação. Geralmente, durante as condições transitórias, os equipamentos da instalação são mais exigidos e, por isso, as análises de transitórios eletromagnéticos determinam a sua especificação. Os estudos submetidos no projeto básico têm como objetivo identificar as situações mais críticas e especificar os equipamentos de acordo com essas necessidades.

De maneira sintetizada, pode-se dividir as grandezas a serem monitoradas durante a operação transitória da rede em quatro grupos principais: sobretensões, sobrecorrentes, distorções nas formas de onda e fenômenos eletromagnéticos e eletromecânicos. Os elementos que formam o sistema interagem e se comportam de forma específica a essas perturbações podendo apresentar respostas amortecidas ou não que variam com frequência. Diversos elementos com características não lineares podem aumentar o conteúdo harmônico e distorcer os sinais em relação à frequência fundamental. Dessa forma, a correta modelagem das não linearidades é fundamental para precisão das simulações (ONS, 2022a).

Nas avaliações de regime permanente é razoável adotar uma simplificação e modelar a rede como equilibrada e monofásica não comprometendo os resultados dessas análises. No entanto, para as análises de transitórios eletromagnéticos, deve-se considerar a representação trifásica do sistema. Devido à necessidade de uma representação tão detalhada e, por limitações de ferramentas, atualmente a modelagem do SIN em sua totalidade não é factível. Neste contexto, a partir dos objetivos de cada análise, deve-se definir uma sub-rede que represente com precisão o fenômeno analisado.

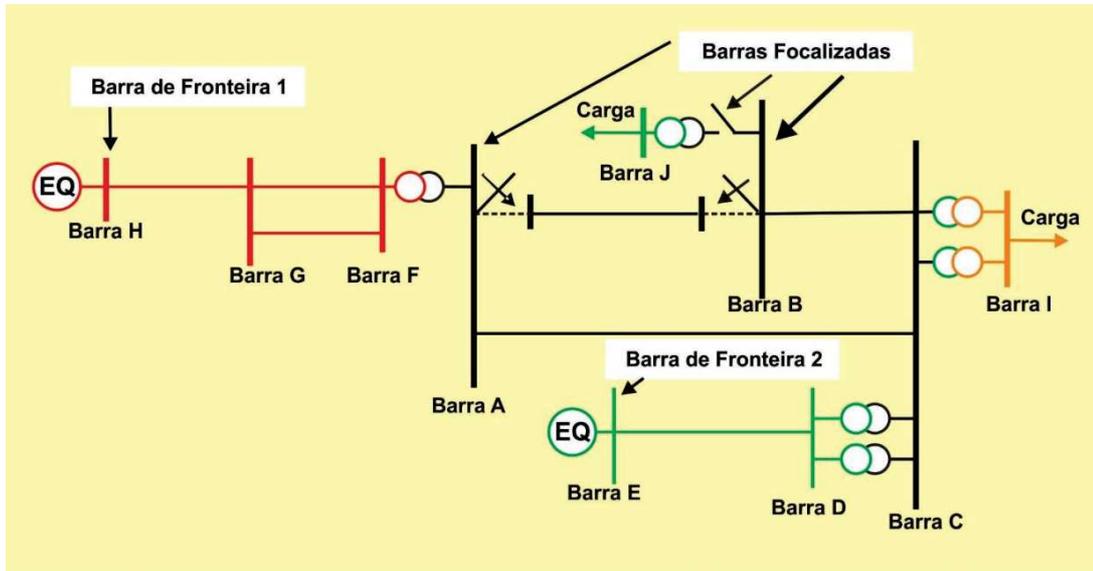
Após definir a rede de interesse, também denominada rede retida, o restante do sistema é representado por equivalentes caracterizados por suas impedâncias de curto-circuito de sequência zero e positiva vistas a partir das barras de fronteiras. Para definir este limiar, é imprescindível selecionar os pontos do sistema nos quais o equivalente não exerça influência significativa na resposta transitória. Além disso, é importante modelar elementos não lineares, como curvas de saturação de transformadores, para evitar a supressão de excitações em frequências harmônicas.

Conforme indicação de (ONS, 2022a), a rede retida deve ser definida considerado no mínimo a segunda vizinhança após a barra de manobra. Sendo a primeira vizinhança a barra adjacente à barra de manobra. Para melhor exemplificação, a Figura 8 ilustra esses conceitos de vizinhança.

Embora a diretriz do ONS seja suficiente para a modelagem da maioria dos casos, cabe ressaltar que para toda escolha das barras de fronteira deve haver uma análise técnica mais detalhada. Por exemplo, dado que duas subestações sejam separadas por uma linha de 5 km, uma subestação não deve ser considerada primeira vizinhança da outra devido ao pequeno comprimento da linha que torna as duas subestações praticamente o mesmo ponto elétrico.

Além da representação dos equivalentes, estes estudos precisam de condições iniciais previamente ajustadas: tensões de pré-manobra, níveis de curto-circuito e topologia da rede válida e inclusão dos elementos com respostas não lineares.

Figura 8 – Rede retida e suas vizinhanças.



Fonte: ONS (2022a).

2.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

No Brasil, o ONS elabora os relatórios estatísticos contendo informações acerca da natureza elétrica dos desligamentos e da operação dos regimentos automáticos. A partir dos dados apresentados, por exemplo para o ano de 2021, as faltas fase-terra corresponderam a 83,9% na rede básica. Neste contexto, o RAM é um recurso importante da operação dos SEP contribuindo para a continuidade e confiabilidade do suprimento de energia. No entanto, na etapa de especificação das instalações, é imprescindível que sejam realizados os estudos que determinam a viabilidade da utilização dessa manobra. Em relação às atuações satisfatórias do RAM, o percentual atingiu 76,8% entre os anos de 2018 e 2022 mostrando a necessidade de sempre buscar na etapa de especificação soluções que maximizem a probabilidade de sucesso dessa manobra.

Atualmente há dois critérios definidos nos Procedimentos de Rede utilizados nas análises de viabilidade do RAM. Há algumas soluções que podem ser empregadas para reduzir a corrente de arco secundário e viabilizar a manobra. Nas instalações presentes no SIN, quando indicada a necessidade, o emprego do reator de neutro é muito comum em linha que são compensadas. De forma geral, um dos principais desafios é a determinação do tempo morto mínimo para extinção do arco secundário e, neste contexto, a apresenta diversos artigos que buscam estimar o tempo ótimo para o religamento. Nas últimas décadas, vem sendo estudadas técnicas através das análises dos sinais de tensão e corrente do sistema para identificar se a falta é temporária e o instante mais seguro para efetuar o RAM.

Diante do exposto, o presente capítulo apresentou os principais conceitos relaciona-

dos ao RAM, mostrando dados reais de aplicação e de atuação nas linhas da rede básica do Brasil. Além disso, contextualizou as etapas da manobra e as grandezas monitoras e consideradas nos critérios vigentes e abordou técnicas empregadas para maximizar o sucesso da manobra.

3 AUTOMATIZAÇÃO DAS ANÁLISES VIA PYTHON E ATP

Conforme apresentado no Capítulo 2, as análises e testes de viabilidade do RAM são explorados a pelo menos 80 anos. Desde então, busca-se por soluções que viabilizam a manobra no menor tempo morto possível. Na revisão bibliográfica apresentada, os estudos de caso foram realizados considerando uma determinada topologia para linha e rede. Neste contexto, uma ferramenta que possibilite a análise de múltiplos cenários a partir de variações dos casos base irá agregar confiabilidade na apresentação de quaisquer estudos associados ao RAM. No presente capítulo, será discutida a automatização das simulações do RAM utilizando algoritmos em Python.

Atualmente, há diversos programas que podem ser utilizados para as análises de transitórios eletromagnéticos como ATP, PSCAD/EMTDC, EMTP-RV entre outros. Neste trabalho, será adotado o ATP para os cálculos dos fenômenos transitórios, devido sua utilização nas simulações apresentadas na etapa de Projeto Básico e por ser um *software* de domínio público (ONS, 2022c). O ATP utiliza métodos de solução numérica como integração trapezoidal para resolver as equações diferenciais dos componentes do sistema no domínio do tempo. As análises de transitórios são realizadas a partir de condições iniciais em regime permanente que, no ATP, são determinadas por uma solução fasorial ou podem ser inseridas manualmente pelo usuário.

Com a modelagem adequada da rede e a definição dos parâmetros de simulação e das variáveis monitoradas, o sistema pode ser simulado. Como resposta, o ATP gera arquivos de saída contendo resultados para as grandezas observadas durante a simulação: corrente, tensão, potência, energia e sinais de controle que podem ser interpretadas e plotadas por programas auxiliares, como o PlotXY. Além disso, gera-se também arquivos com os parâmetros e comportamento da simulação, como o .LIS entre outros.

Os arquivos de entrada do ATP contêm os modelos e características dos sistemas elétricos em cartões de dados no formato texto que podem ser escritos e/ou alterados em qualquer editor desde que o arquivo seja salvo no formato ASCII. Ressalta-se que para a leitura e execução bem-sucedida do ATP, a estrutura dos cartões para a execução deve seguir rigorosamente uma formatação pré-estabelecida, isto é, os parâmetros devem ser alocados em posições específicas das colunas dos cartões conforme apresentado em (Leuven EMTP Center, 1992). A partir deste conceito, a identificação e alteração de um determinado dado de um elemento qualquer da rede ocorrerá sempre na mesma linha e campo pré-determinados.

Para realizar as simulações, o sistema pode ser modelado diretamente nos cartões de texto ou via ATPdraw que é uma interface gráfica que permite de maneira intuitiva a criação e configuração dos elementos da rede através de modelos específicos. No presente trabalho, será utilizada a segunda opção para a construção dos casos.

Diante do exposto, a partir do sistema e manobra definidos nos cartões da dados, será proposta uma rotina implementada em Python que possibilitará coordenar as simulações de múltiplos cenários de forma automática. Os principais passos dessa rotina estão apresentados na Figura 9. Primeiramente, a rede elétrica contendo a linha objeto da manobra é modelada gerando o arquivo ATP que contém a configuração do sistema, os elementos representados e os parâmetros utilizados em seus respectivos modelos. Em complemento a esta etapa, modela-se a linha gerando os arquivos DAT que armazenam as disposições geométricas e as características elétricas dos cabos condutores e para-raios. Além disso, define-se os parâmetros de simulação como o número de casos que serão analisados, as variáveis que serão alteradas e as grandezas monitoradas. Após estas etapas, o algoritmo faz a leitura dessas informações, seguido da identificação, alteração das variáveis no caso base, execução do ATP, leitura, interpretação e armazenamento dos resultados. Enquanto a condição de término não for atendida, o ciclo se reinicia com a alteração as variáveis gerando um novo caso. Quando todos os cenários são simulados, o algoritmo plota as grandezas monitoradas.

Para fins de exemplificação e complemento da Figura 9, o Algoritmo 1 apresenta através de um pseudocódigo os passos descritos anteriormente. Ressalta-se a linha 7 onde é realizada a execução do ATP para o novo caso gerado. Neste trabalho foi utilizada a função *subprocess.Popen* do módulo *Subprocess* que permite a execução de outro programa através do Python. Essa função permite a criação de um objeto para possibilitar a interação direta entre o algoritmo e o subprocesso de execução do ATP (Python Documentation, 2023).

Algoritmo 1: rotina para gerenciar as simulações

```

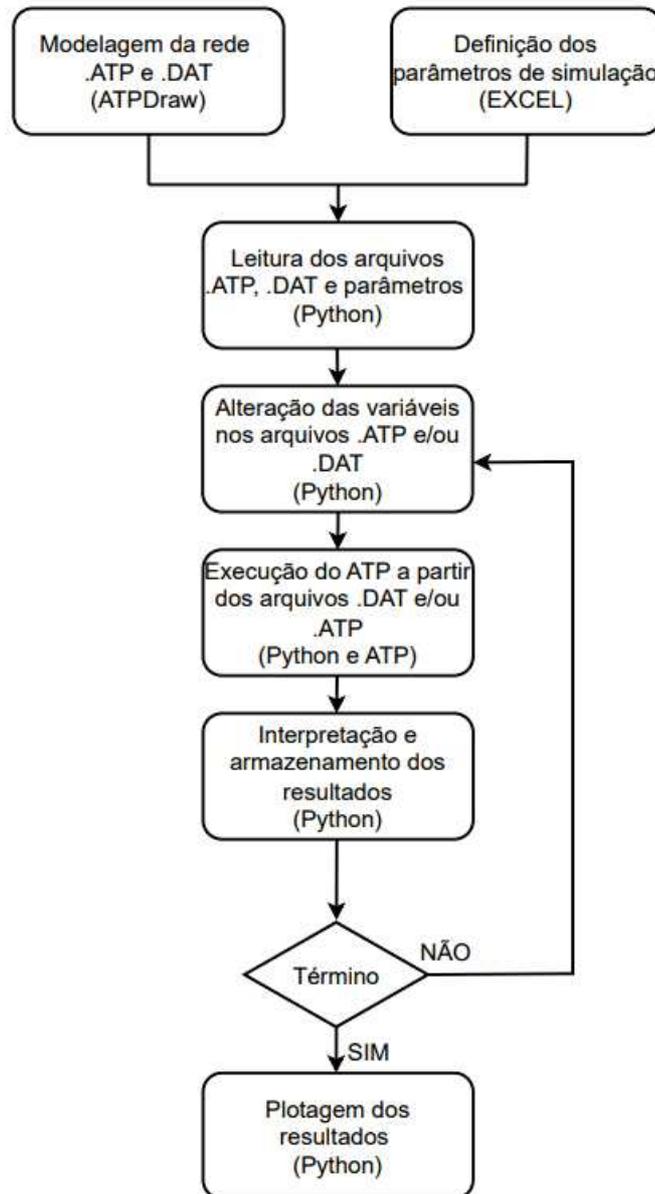
1 Leitura do caso base;
2 Leitura dos parâmetros de simulação;
3 while condição do
4     Cálculo do valor da nova variável;
5     Identificação da posição variável no .ATP e/ou .DAT;
6     Alteração do caso;
7     Execução do ATP;
8     Resultados do PL4 = Leitura do .PL4(saída do ATP em .PL4);
9     Resultados = Interpretação dos resultados(Resultados do PL4);
10 end
11 return Resultados;

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O código mostrado na Figura 10 apresenta uma função, `executa_ATP`, com comandos em sintaxe Python que realizam a execução do caso. Para essa etapa, a função recebe o endereço do executável `runATP.exe` e o endereço do arquivo com o caso `endereco_atp`. Os comandos entre as linhas 5 e 10 garantem que a simulação principal continuará apenas quando a simulação no ATP for finalizada, isto é, a saída indicar que o ATP foi finalizado.

Figura 9 – Fluxograma de gerenciamento das simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após a execução de cada cenário, o algoritmo faz a leitura do arquivo .PL4, linha 8 do algoritmo 1, utilizando uma função disponível em (MATTOS, 2020) que faz a leitura do arquivo .PL4 e armazena em uma variável tipo *tuple* do Python todas as grandezas monitoradas durante a simulação. Em seguida, realiza-se o tratamento dos dados. Conforme conceitos apresentados na Seção 2.2 através da Figura 4, para as simulações no domínio do tempo o algoritmo identificará o valor máximo do último pico da corrente de arco secundário antecedente à sua extinção e o primeiro pico da TRT após a extinção da corrente. Para cada caso, será armazenado este par de valores. Para as simulações no domínio da frequência que monitoram a tensão induzida na fase aberta e sobre os reatores de neutro quando aplicáveis, serão armazenados os valores máximos na faixa de frequência

Figura 10 – Rotina para execução do ATP.

```

1 import subprocess as sub
2 def executa_ATP(endereco_exe, endereco_atp):
3     # executar o ATP para o arquivo .ATP e/ou .DAT
4     exe_atp = sub.Popen(endereco_exe + endereco_atp, stdout=sub.PIPE,
5                          shell=True)
6     str_f = "ATP Finished"
7     output = str(exe_atp.stdout.readline())
8     str_finish = str_f in output
9     while str_finish == False:
10        output = str(exe_atp.stdout.readline())
11        str_finish = str_f in output
12    return 0

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

simulada.

As análises que serão apresentadas no próximo capítulo permitirá a avaliação da variação de quatro elementos na rede modelada: comprimento da linha, reatores de compensação em derivação, reatores de neutro e silhueta típica da linha. Neste contexto, o algoritmo implementado receberá as informações dos nós aos quais esses elementos estão conectados e quais os valores dos parâmetros que cada elemento receberá para um determinado cenário.

3.1 ALTERAÇÃO DOS REATORES EM DERIVAÇÃO E DE NEUTRO

Para fins de estudos de viabilidade do religamento monopolar, os reatores são modelados no ATP através de uma indutância podendo também ser associada a uma resistência para representação das perdas. Para esse fim, pode-se utilizar um elemento RLC cujos parâmetros requeridos estão definidos nas linhas de entrada do cartão do ATP, conforme exemplo apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Representação do elemento RLC no ATP.

C REATOR DE LINHA TERMINAL_1 - TERMINAL_2 C1			
C	< n1 >	< n2 >	<ref1><ref2>< R > < A > < B > <Leng><><>0
	T_TE1ARN_TE1	3.21063.8	0
	T_TE1BRN_TE1	3.21063.8	0
	T_TE1CRN_TE1	3.21063.8	0
	RN_TE1	800.	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nas posições definidas nas colunas < n1 > e < n2 > devem ser inseridos os nós

aos quais o reator está conectado. Já nos espaços associados a <ref1><ref2> podem ser inseridos os nomes utilizados para identificação de cada elemento cujo preenchimento é imprescindível quando há elementos em paralelos conectados aos mesmos nós elétricos. Por fim, a resistência do reator é inserida na posição < R > e a reatância na posição < A >. Os espaços alocados para a capacitância < B > e o comprimento <Leng> ficam vazios na modelagem do reator. No exemplo acima, a primeira linha define a fase A do banco de reator trifásico de compensação conectada entre o nó T_TE1A e o nó RN_TE1 assumindo resistência de $3,2\ \Omega$ e reatância de $1063,8\ \Omega$. Além disso, para este trabalho, ressalta-se que os reatores foram modelados com valores em Ω calculados para a frequência de 60 Hz. A última linha define o reator de neutro conectado ao nó 1 RN_TE1 e nó 2 está vazio indicando conexão a terra. Maiores informações e detalhes sobre esses parâmetros podem ser consultados em (Leuven EMTP Center, 1992).

Para realizar as análises da variação do reator em derivação ou de neutro, o usuário deve passar como parâmetros para o algoritmo as seguintes informações:

- Nomes dos nós 1 e 2 aos quais o reator está conectado;
- Faixa de valores dos reatores a ser avaliada;
- Número de simulações a serem realizadas;
- As variáveis monitoradas;
- Os arquivos .ATP com a representação da rede e dos reatores.

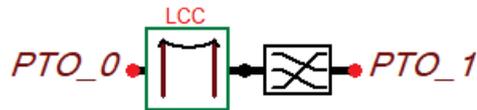
3.2 ALTERAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA

Para as avaliações de religamento monopolar, a linha em análise deve ser modelada pela sub-rotina *Line Constants* (LCC) que realiza os cálculos dos parâmetros elétricos. Essa sub-rotina conta com as definições das características elétricas e geométricas dos cabos condutores e para-raios. Além disso, essa modelagem permite a representação dos ciclos de transposição e dos acoplamentos com outras linhas que podem operar em paralelo. Essas representações são imprescindíveis para o cálculo dos parâmetros elétricos da linha que agregam precisão nos resultados visto a forte influência dos acoplamentos entre fases e outros circuitos na corrente de arco secundário. Ressalta-se que a LCC é uma rotina auxiliar para o cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão aéreas e seu resultado é utilizado para complementar as informações contidas no arquivo principal de dados .ATP do caso em análise.

As linhas consideradas no presente trabalho foram modeladas com ciclo de transposição 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 com sequência ABC, isto é, no primeiro ciclo a fase A passa para a posição da fase B, a fase B para C e a fase C para A. Dessa forma, a modelagem

completa da linha conta com quatro trechos modelados através do LCC. Cabe ressaltar que toda a modelagem da rede incluindo a modelagem da linha no LCC foram realizadas graficamente através do programa ATPDraw. A Figura 12 ilustra o primeiro trecho de transposição da linha.

Figura 12 – Modelagem da linha através do LCC no ATPDraw.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os dados elétricos e geométricos dos condutores e para-raios para uma determinada silhueta são inseridos na aba de dados da LCC. A Figura 13 ilustra o preenchimentos dos dados de uma linha com condutores singelos e dois para-raios.

Figura 13 – Parâmetros a serem inseridos no LCC.

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0	1.575	0.0562	-3.43	25.17	7.5	0	0	1
2	2	0	1.575	0.0562	3.43	25.17	7.5	0	0	1
3	3	0	1.575	0.0562	-3.43	30.67	13	0	0	1
4	0	0	0.457	4.2322	-3.43	35.18	20.57	0	0	1
5	0	0.36	0.67	0.803	3.43	35.18	20.57	0	0	1

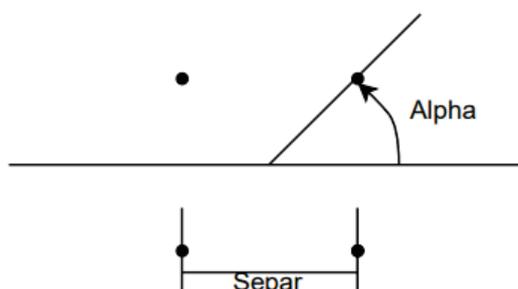
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O primeiro parâmetro, definido como Ph. no, recebe a numeração de fase de cada condutor. Todos os condutores com o mesmo número serão considerados pertencentes a um conjunto de cabos geminados de uma mesma fase. O segundo dado, definido como Rin, é utilizado apenas quando o efeito pelicular é considerado e tem relação direta com a resistência do cabo definida por Resis. Quando o efeito pelicular não é considerado, o parâmetro Rin deve ser igual a 0,0 e o parâmetro Resis igual à resistência CA do condutor. Caso contrário, Rin deve ser preenchido com a relação T/D do condutor e o parâmetro Resis com valor de sua resistência CC. Ressalta-se que T representa a espessura do condutor tubular e D seu diâmetro externo.

Os três próximos parâmetros estão relacionados à posição do centro geométrico dos condutores com relação ao solo, conforme definições listadas abaixo:

- **Horiz:** este parâmetro recebe a distância horizontal entre o centro do condutor ou feixe de cabos geminados a um referencial especificado pelo usuário. Este referencial

Figura 14 – Feixe com 4 condutores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

é genérico e pode ser qualquer ponto da torre, mas deve ser o mesmo para todos os cabos;

- **V_{tower}**: refere-se à altura vertical do centro do condutor na torre em relação ao solo;
- **V_{mid}**: refere-se à altura vertical do centro do cabo condutor no meio do vão em relação do solo.

Os últimos três parâmetros, **Separ**, **Alpha** e **NB**, podem ser preenchidos de duas formas. Uma delas visa facilitar o preenchimento de feixe de condutores simétricos. Por exemplo, para o conjunto de 4 condutores apresentados na Figura 14, é possível realizar o preenchimento do conjunto em uma única linha informando os parâmetros **Separ** que representa a distância entre cada condutor, e o **Alpha** que é o ângulo entre a linha horizontal que corta o centro feixe e o primeiro condutor e, por fim, o número de condutores **NB** que, para este exemplo, receberia o valor 4.

Uma maneira alternativa a descrita acima é informar as posições geométricas de cada condutor. Neste caso, os parâmetros **Separ** e **Alpha** recebem o valor 0 e o parâmetro **NB** recebe 1. Esta última, é a única forma de preenchimento de cabos singelos ou feixes assimétricos.

Com os dados devidamente modelados, a sub-rotina LCC gera um arquivo .DAT, conforme exemplo mostrado na Figura 15, com a estrutura e informações supracitadas. Ressalta-se que para este exemplo, considerou-se o valor da resistividade média do solo igual a $1000 \Omega \text{ m}$ e o comprimento do trecho da linha igual a 31,17 km.

Para a alteração do comprimento da linha respeitando o ciclo de transposição é fundamental definir corretamente as conexões elétricas de cada trecho modelado da linha. Essas conexões são definidas após a palavra **BRANCH** no arquivo .DAT. Por exemplo, para o primeiro trecho mostrado na Figura 12, a definição dos nós elétricos de entrada e de saída da sub-rotina já considerando a transposição seria da seguinte forma:

Figura 15 – Representação da linha no .DAT

```

BEGIN NEW DATA CASE
LINE CONSTANTS
$ERASE
BRANCH  PTO_0APTO_1BPTO_0BPTO_1CPTO_0CPTO_1A
METRIC
  1  .5  .0562 4          3.15  -3.43  25.17   7.5   0.0  0.0   1
  2  .5  .0562 4          3.15   3.43  25.17   7.5   0.0  0.0   1
  3  .5  .0562 4          3.15  -3.43  30.67  13.   0.0  0.0   1
  0  .5  4.2322 4        0.914  -3.43  35.18  20.57  0.0  0.0   1
  0.2313  .803 4          1.34   3.43  35.18  20.57  0.0  0.0   1
BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
  1.E3      60.          31.17          1
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
$PUNCH
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

```

BRANCH  PTO_0APTO_1BPTO_0BPTO_1CPTO_0CPTO_1A

```

Como o circuito é trifásico, há três ligações. Para a primeira fase, tem-se a sequência PTO_0APTO_1B que significa que o nó PTO_0 entra na fase A e o nó de saída PTO_1 é conectado na posição da fase B. O comprimento da linha, parâmetro a ser variado nas análises deste trabalho, estará sempre antes do comando mostrado abaixo exatamente entre as colunas 45 e 52.

```

BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS

```

A correta definição e conhecimento dessas informações são imprescindíveis para a execução correta do algoritmo. Para cada alteração e novo caso gerado, a execução do ATP para o .DAT gera um arquivo .PCH contendo a matriz de transformação para a frequência especificada e o novo comprimento da linha. Cabe ressaltar que cada trecho modelado pelo LCC irá receber a fração de comprimento da linha, conforme esquema de transposição considerado. Para este estudo, o usuário deverá informar como parâmetros para a algoritmo os seguintes dados:

- Nomes dos nós de entrada e saída de cada LCC;
- Faixa de valores a ser considerada para o comprimento da linha;
- Número de simulações a serem realizadas;
- As variáveis monitoradas;

- Os arquivos .DAT com os parâmetros elétricos e geométricos da linha;
- Os arquivos .ATP com a representação da rede.

3.3 ALTERAÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA E DOS REATORES

Os valores dos reatores de compensação são calculados a partir do percentual de compensação definido para atender às necessidades operativas da linha. Dessa forma, torna-se interessante variar na mesma análise tanto o comprimento da linha quanto o valor dos reatores terminais para manter fixo o percentual de compensação nominal.

Neste sentido, esta análise contará com as alterações no .DAT (informando o novo comprimento da linha) e também no .ATP (definindo os novos reatores). Além dos parâmetros já mencionados acima, o usuário também deverá informar o percentual de compensação e os parâmetros distribuídos de sequência positiva de toda a linha, isto é, considerando todos os trechos modelados e ciclo de transposição. A partir desses dados, o algoritmo calculará a potência dos reatores terminais para cada comprimento da linha para manter fixo o percentual de compensação. Para esses cálculos, será considerando o modelo π da linha resultando nas equações definidas por (3.1), sendo, r^{pos} a resistência de sequência positiva, x^{pos} a reatância de sequência positiva, b^{pos} a susceptância de sequência positiva, V_B tensão base da linha, l o comprimento, p o percentual de compensação, γ a contante de propagação, Z_c impedância característica, Y' admitância transversal, Q_c potência reativa capacitiva total da linha e, por fim, Q_{RT} a potência dos reatores terminais.

Para exemplificação, considera-se uma linha com $r^{pos} = 0,0138 \Omega/\text{km}$, $x^{pos} = 0,1920 \Omega/\text{km}$, $b^{pos} = 8,652 \mu\text{S}/\text{km}$, $V_B = 500 \text{ V}$ e $l = 400 \text{ km}$. Para atingir um percentual de compensação $p = 63 \%$ seriam necessários reatores em ambos os terminais com potência $Q_{RT} = 280 \text{ Mvar}$ que compensaria uma parcela do carregamento capacitivo da linha.

$$z = r^{pos} + ix^{pos} \quad (3.1a)$$

$$y = 0 + ib^{pos} \quad (3.1b)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (3.1c)$$

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad (3.1d)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \left(\frac{\cosh(\gamma l) - 1}{\sinh(\gamma l)} \right) \quad (3.1e)$$

$$Q_C = V_b^2 |Y'| \quad (3.1f)$$

$$Q_{RT} = \frac{pQ_C}{2} \quad (3.1g)$$

3.4 ALTERAÇÃO DA ESTRUTURA DE TORRE TÍPICA PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS

O cálculo dos parâmetros da linha de transmissão considera uma estrutura típica que geralmente é a de maior recorrência. Dessa forma, tanto os parâmetros elétricos quanto as disposições geométricas dos cabos da linha são os mesmos em toda sua extensão. Entretanto, na prática, linhas de transmissão reais utilizam diferentes tipos de estruturas.

Assim, visando considerar os efeitos da utilização de outras torres ao longo de uma linha, serão analisados cenários considerando a representação da linha com duas estruturas típicas. A partir dessa configuração, serão avaliados casos variando o percentual de utilização das duas estruturas típicas e seus impactos no RAM.

Desse modo, para este estudo, o usuário deverá informar como parâmetros para o algoritmo os seguintes dados:

- Nomes dos nós de entrada e saída de cada LCC;
- Faixa de valores do percentual de utilização da segunda estrutura típica;
- Número de simulações a serem realizadas;
- As variáveis monitoradas;
- Os arquivos .DAT com os parâmetros elétricos e geométricos da linha;
- Os arquivos .ATP com a representação da rede.

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados os conceitos gerais de estruturação dos parâmetros elétricos dos arquivos .ATP e .DAT que, para este trabalho, foram gerados pelo ATPDraw. Considerando que toda a rede é modelada seguindo uma formatação pré-estabelecida em posições fixas nos cartões, foi apresentada uma metodologia que permite o gerenciamento de alterações de parâmetros da rede nos cartões, execução do ATP e processamento dos resultados. Para exemplificação, o Apêndice B apresenta um exemplo do código implementado para a avaliação do RM devido à alteração dos valores dos reatores de neutro.

Com a lógica apresentada, será possível realizar as análises de sensibilidade dos parâmetros monitorados no RAM para as variações propostas no presente trabalho que serão apresentadas no capítulo seguinte: alterar o comprimento da linha, reatores de compensação e de neutro e as estruturas das torres típicas consideradas na modelagem da linha. Neste contexto, foram apresentados os dados de entrada necessários ao algoritmo para realização das análises de cada uma das variações supracitadas.

4 ESTUDOS DE CASO EM ESTRUTURAS TÍPICAS DO SIN

Para atender às necessidades sistêmicas garantindo confiabilidade no menor custo global, a malha de transmissão da rede básica do sistema elétrico de potência do Brasil é caracterizada por diversas e extensas linhas de variados níveis de tensão. Em junho de 2023, o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) alcançou uma extensão total de 183.607 quilômetros de linhas de transmissão em pleno funcionamento (Ministério de Minas e Energia, 2023). Desse montante, 47,6% pertencem às classes de tensão variando de 230 a 440 kV, enquanto os restantes 52,4% correspondem às classes de tensão situadas entre 500 e 800 kV, conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 6 – Extensão linha de transmissão no SIN em 2023.

Tensão [kV]	Extensão [km]	Porcentagem [%]
230	69.656	37,9
345	10.899	5,9
440	6.935	3,8
500	71.413	38,9
600	12.816	7,0
765	2.683	1,5
800	9.204	5,0
Total	183.607	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

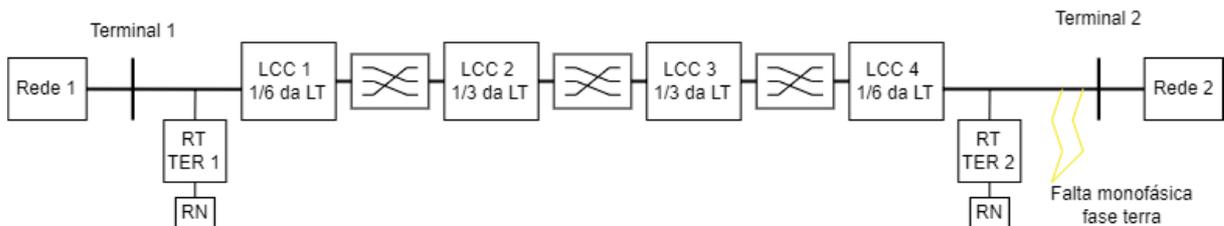
Observa-se na Tabela 6 uma predominância dos níveis de tensão de 230 e 500 kV. Dessa forma, as análises do presente trabalho focaram em linhas desses níveis de tensões.

4.1 DIRETRIZES PARA AS SIMULAÇÕES E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As linhas e os sistemas modelados neste trabalho podem ser representados pelo diagrama da Figura 16. As redes equivalentes 1 e 2 foram definidas considerando o critério da segunda vizinhança detalhado na Seção 2.5. Depois de estabelecer essa rede de interesse, também conhecida como rede retida, o restante do sistema é representado por equivalentes caracterizados por suas impedâncias de curto-circuito de sequência zero e positiva vistas das barras de fronteira. Para determinar esse limite, é essencial selecionar os pontos do sistema nos quais o equivalente não tenha uma influência significativa na resposta transitória dos estudos do RAM. Além disso, é fundamental modelar elementos não lineares, como as curvas de saturação de transformadores, para evitar a supressão de excitações em frequências harmônicas.

Todas as linhas analisadas foram modeladas considerando o ciclo de transposição completo de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 representados pelos trechos com a respectiva porcentagem do comprimento da linha na sub-rotina LCC. Além disso, todas as linhas possuem compensação reativa em derivação possibilitando a utilização dos reatores de neutro.

Figura 16 – Diagrama da modelagem das linhas em análise.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados apresentados nas próximas seções foram extraídos de duas análises: a primeira considerando simulações no domínio do tempo para avaliar a intensidade do último pico da corrente de arco secundário e o primeiro pico da TRT, conforme conceitos e representação gráfica apresentados na Seção 2.2; a segunda considerando o domínio da frequência para monitorar as tensões induzidas durante a manobra na fase aberta e nos reatores de neutro quando aplicáveis.

Para realizar as simulações no domínio do tempo, foram considerados os seguintes eventos:

- Falta monofásica na fase A no terminal 2 da linha em $t = 0,05$ s;
- Abertura do disjuntor do terminal 2 em $t = 0,15$ s;
- Abertura do disjuntor do terminal 1 em $t = 0,17$ s;
- Extinção do arco secundário em $t = 0,67$ s.

Cabe ressaltar que o instante no qual a falta monofásica é aplicada não tem influência significativa na corrente de arco secundário induzida na fase aberta visto que a intensidade desta corrente é determinada pelos acoplamentos eletromagnéticos com as fases sãs e circuito em paralelo caso existam. Para a atuação da proteção, foram adotados tempos típicos de abertura dos disjuntores respeitando os critérios mínimos definidos no Procedimentos de Rede (ONS, 2022d). A abertura do disjuntor do terminal 2 ocorreu em 100 ms após a aplicação da falta e, levando em consideração um tempo de 20 ms para comunicação entre os terminais, o disjuntor do terminal 1 atuou em 0,17 s. A extinção do arco foi simulada considerando um intervalo de 500 ms.

Nessas análises, foram monitoradas a corrente de falta seguida do arco secundário e a tensão no ponto de falta que permite monitorar o primeiro pico da TRT. Para a

apresentação dos resultados, o par de valores V_p e I_{arc} será plotado no gráfico do primeiro critério para ilustrar de forma visual e direta a influência das variações analisadas na viabilidade do RAM.

Em relação às análises no domínio da frequência, considerou-se a fase na qual a falta foi aplicada na simulação do tempo aberta para realizar as simulações no espectro de frequência de 56 a 66 Hz monitorando as tensões em seus terminais e também a tensão nos reatores de neutro quando aplicáveis. Ressalta-se que, para cada cenário estudado, foram armazenadas as máximas tensões monitoradas na faixa de frequência supracitada. Para apresentação dos resultados, as curvas plotadas se referem ao valor de crista fase terra máximo das tensões induzidas na fase aberta.

Nas simulações, considerou-se inicialmente para cada linha, comprimento, compensação e reatores de neutro, quando aplicáveis, em seus valores nominais e, a partir dessa condição, foram realizadas as alterações. Cabe ressaltar que a metodologia proposta nesse trabalho de automatização das simulações permite a discretização e análise de múltiplos casos. Para fins de apresentação dos resultados, adotou-se simular 100 cenários para cada parâmetro variado.

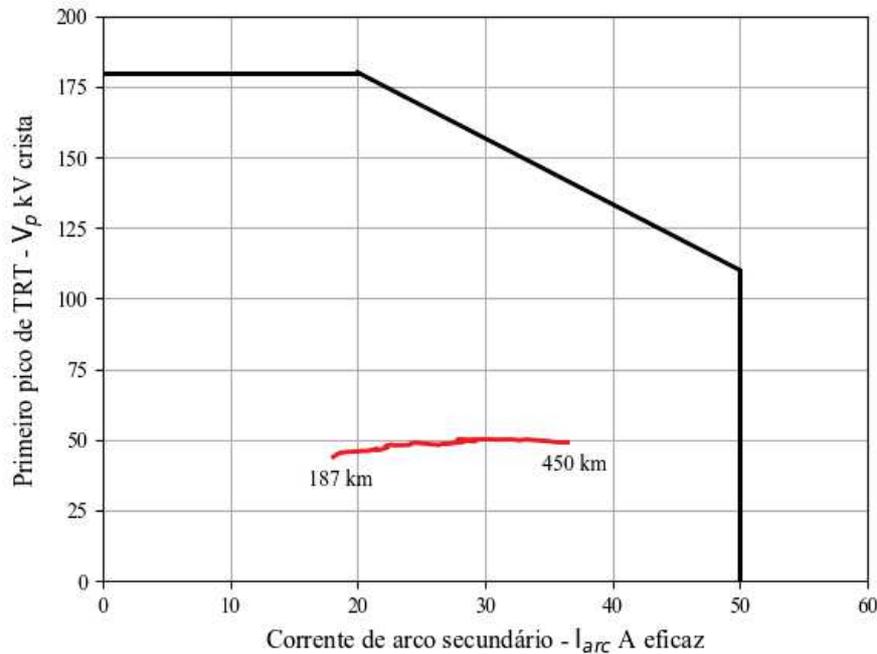
4.2 ANÁLISE CONSIDERANDO SILHUETA TÍPICA DE 230 kV

Nesta seção, serão apresentados os estudos considerando uma linha de 230 kV com estrutura típica estaiada monomastro (tipo vela) cujas características geométricas estão detalhadas no Apêndice A juntamente com os parâmetros elétricos dos cabos condutores e dos para-raios. A partir das relações apresentadas Seção 2.2, sabe-se que linhas nesse nível de tensão geralmente apresentam bom desempenho de viabilidade do RAM devido a seu baixo acoplamento capacitivo comparado a linhas de tensões superiores. No entanto, as análises do religamento monopolar não é dispensável, pois, dependendo do comprimento da linha, esta pode não atender aos critérios de viabilidade do RAM. Além disso, para linhas compensadas, pode haver condições de ressonância identificadas nesses estudos que podem induzir tesões que extrapolam a coordenação de isolamento da linha.

Nas condições nominais da presente linha, isto é, com 187 km de extensão e 10 Mvar de compensação sem a utilização de reatores de neutro, o valor da corrente de arco secundário foi de 18,1 A e o do primeiro pico de TRT de 43,9 kV crista. Nessa condição, a linha atende com folga o primeiro critério apresentado na Figura 5.

Sabe-se que o aumento do comprimento da linha e, conseqüentemente, do acoplamento capacitivo entre as fases impacta significativamente a corrente de arco secundário. Neste contexto, a extensão da linha foi variada até atingir 450 km que representa uma boa aproximação do comprimento máximo das linhas do SIN. A influência dessa variação no par de valores V_p e I_{arc} está apresentada na Figura 17 cujos resultados foram obtidos das simulações no tempo. Observa-se que para toda a faixa de comprimentos analisada, o par

Figura 17 – Primeiro critério - variação do comprimento da LT de 230 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

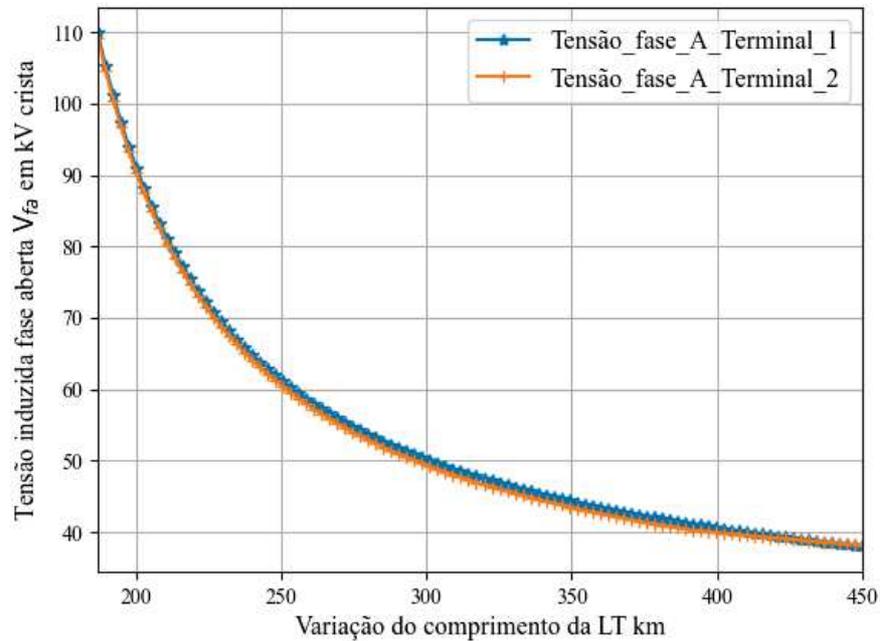
de valores permanece dentro do área de alta probabilidade de sucesso da manobra.

Para a simulação na frequência, foi monitorado o comportamento da tensão da fase aberta em função da variação do comprimento, conforme apresentado na Figura 18. O maior valor de tensão induzida foi de 110 kV que foi decrescendo a medida que a extensão aumentava. Nota-se que em nenhum cenário houve violação do limite da suportabilidade da tensão máxima em condições de emergência da linha equivalente a 253 kV eficazes entre fases ou 206,6 kV de crista fase terra, conforme definido em (ONS, 2022d).

A Tabela 7 apresenta as máximas variações das grandezas monitoradas. Observa-se que o primeiro pico de TRT apresentou uma variação de apenas 11,8% para uma variação superior a 140% do comprimento da linha. Por outro lado, a corrente de arco secundário aumentou significativamente atingindo uma variação de 101,6%. No entanto, este valor ainda está bem abaixo do limite máximo admitido pelo primeiro critério. Em relação à tensão induzida na fase aberta, o comportamento melhorou com o aumento do comprimento da linha chegando a uma variação negativa de -65,4% para o terminal 1.

Diante do exposto, a linha de 230 kV em estudo apresenta bom comportamento frente aos critérios vigentes que são utilizados para determinar a viabilidade do RAM. Ressalta-se que por questões práticas considerando os comprimentos máximos das linhas em CA instaladas no SIN, adotou-se a extensão máxima de 450 km, mas para fins de análise do RAM o comprimento da linha poderia atingir valores superiores. Neste contexto,

Figura 18 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento da LT de 230 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 7 – Variação das grandezas em função do comprimento da LT de 230 kV.

Variável ⁽¹⁾	LT 187 km	LT 450 km	Δ (%)
V_p	43,9	49,1	11,8
I_{arc} [A]	18,1	36,5	101,6
Tensão na fase aberta Ter. 1	110,0	38,0	-65,4
Tensão na fase aberta Ter. 2	109,2	38,2	-65,0

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

como não há desafios para viabilizar o RAM em nenhum dos cenários simulados, não foi necessário investigar outras variações como alteração na compensação ou o emprego de reatores de neutro para a presente linha.

4.3 ANÁLISE CONSIDERANDO SILHUETA TÍPICA DE 500 kV

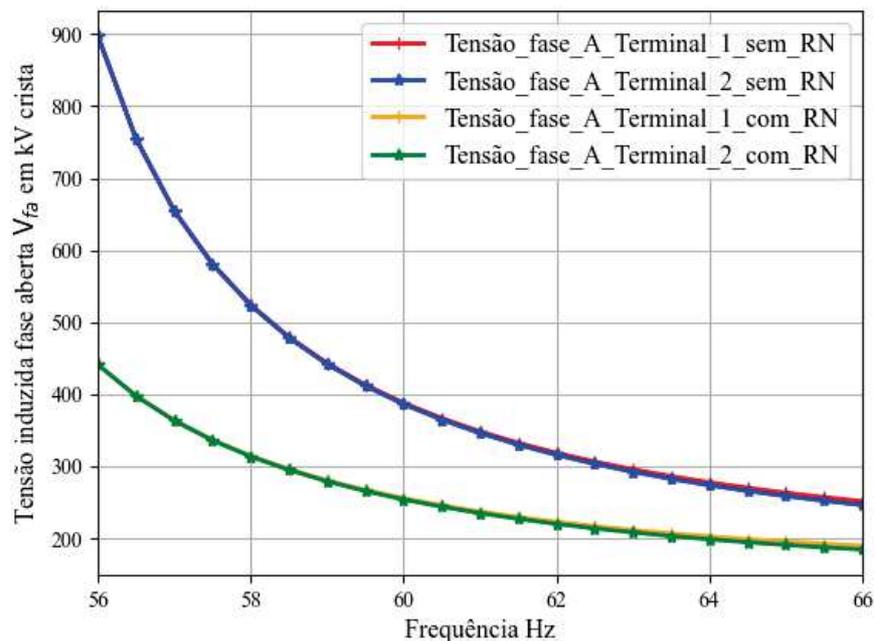
Nesta seção serão apresentados os estudos considerando uma linha de 500 kV com estrutura típica estaiada monomastro (tipo cara de gato) cujas características elétricas e geométricas estão detalhadas no Apêndice A. A linha possui 4 condutores por fase e a utilização desses feixes maximiza a capacidade de transmissão de energia da linha tornando

o sistema mais eficiente e robusto. No entanto, essa característica contribui para elevar a corrente de arco secundário podendo trazer maiores desafios para a viabilidade do RAM.

Em relação aos parâmetros iniciais, a linha possui 152 km de extensão e 70 Mvar de compensação reativa em cada terminal sem a utilização de reatores de neutro. Sob essas condições, o valor da corrente de arco secundário corresponde a 38,3 A enquanto o primeiro pico de TRT ocorre em 80,7 kV. Desse modo, o par de valores V_p e I_{arc} está dentro da área de alta probabilidade de sucesso da manobra apresentada na Figura 5 atendendo o primeiro critério para a condição nominal.

Além dessas grandezas, nas análises no domínio da frequência, foram monitoradas as tensões induzidas na fase aberta em ambos os terminais da linha considerando a faixa de 56 a 66 Hz definida em (ONS, 2022d). O comportamento da tensão da fase aberta nas condições nominais da linha sem reatores de neutro está apresentado nas curvas da Figura 19.

Figura 19 – Tensão da fase aberta da LT de 500 kV para as condições iniciais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

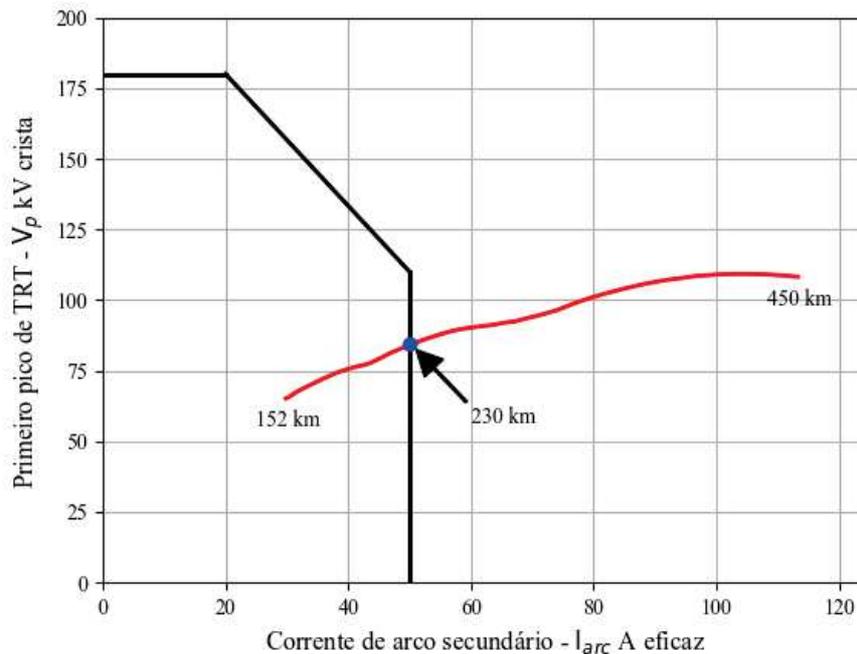
A partir desses resultados, embora o par de valores V_p e I_{arc} esteja dentro da área delimitada da Figura 5, atendendo o critério 1 para a condição inicial, a tensão induzida na fase aberta durante a manobra chega a valores de pico da ordem de 900 kV extrapolando a suportabilidade da linha cuja tensão máxima admissível de pico entre fase e terra em condições de emergência é 489,9 kV ou 600 kV eficazes entre fases. Como solução inicial para deslocar o pico de ressonância, foram projetados reatores de neutro com valor de 200 Ω

seguindo os requisitos definidos na Subseção 2.4.1. Dessa forma, o pico de ressonância foi deslocado da faixa de frequência considerada e o valor máximo da tensão induzida foi de 441,2 kV crista, conforme mostrado nas curvas da Figura 19.

4.3.1 Análises considerando a variação do comprimento da LT de 500 kV

A partir das considerações da seção anterior e considerando os reatores de neutro, o comprimento da linha foi variado até 450 km e o comportamento do par de valores V_p e I_{arc} está apresentado na Figura 20. A partir dos resultados, observa-se que o comprimento máximo dessa linha para atendimento do primeiro critério é de 230 km, para valores superiores a corrente de arco secundário ultrapassa o limite máximo permitido de 50 A.

Figura 20 – Primeiro critério - Variação do comprimento da LT de 500 kV.

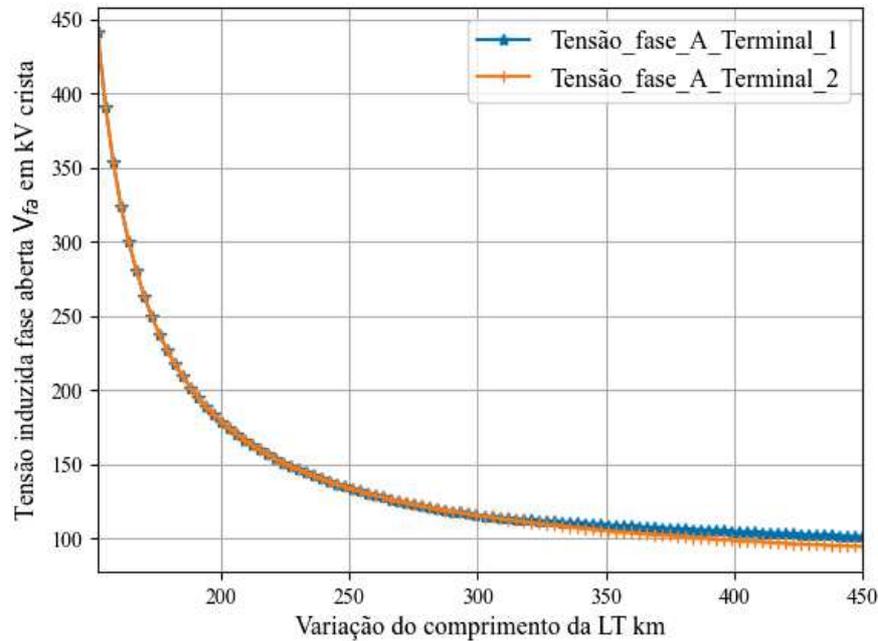


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A tensão induzida na fase aberta apresenta valores adequados para toda a faixa de frequência considerada e extensão da linha analisada não ultrapassando a suportabilidade da linha de 489,9 kV crista fase terra, conforme mostrado na Figura 21. O comportamento decrescente se justifica pela influência da extensão da linha no deslocamento do pico de ressonância para frequências distantes da faixa monitorada que é de 56 a 66 Hz.

De forma semelhante ao monitoramento da tensão induzida na fase aberta, com a presença dos reatores de neutro, deve-se também monitorar a tensão induzida nesse equipamento durante a manobra. Conforme apresentado na Subseção 2.4.1, a especificação desses reatores considera valores típicos de isolamento na ordem de 72,5 kV eficazes. Neste

Figura 21 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento da LT de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

contexto, a Figura 22 apresenta o comportamento da máxima tensão induzida nos reatores na faixa de frequência de 56 a 66 Hz para toda extensão da linha. O maior valor encontrado é de 41,7 kV crista estando abaixo da suportabilidade desses equipamentos comumente instalados no SIN.

Para sintetizar os resultados, a Tabela 8 apresenta as variações das grandezas monitoradas para essa linha considerando seu comprimento mínimo e máximo.

Tabela 8 – Variação das grandezas em função do comprimento da LT de 500 kV.

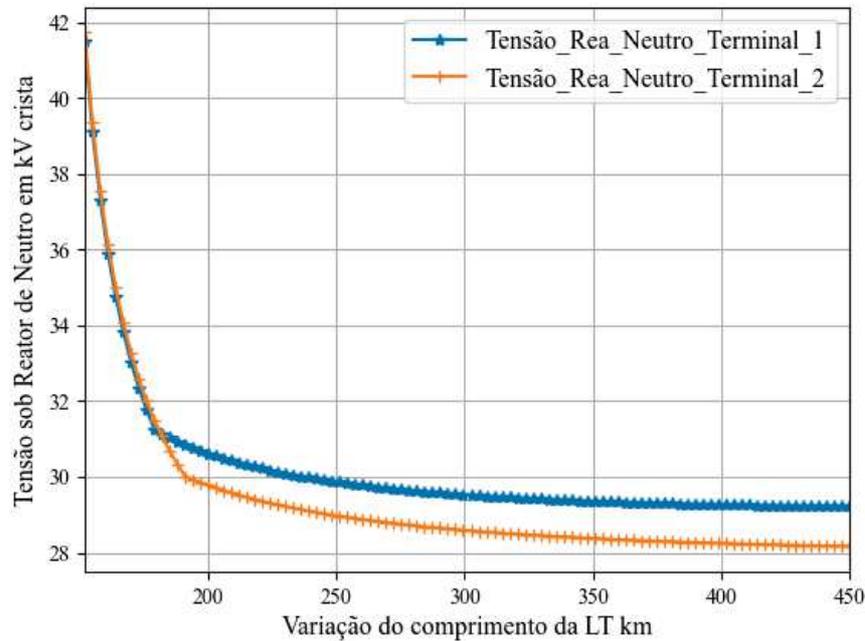
Variável ⁽¹⁾	LT 152 km	LT 450 km	Δ (%)
V_p	65,2	108,2	66,1
I_{arc} [A]	29,8	113,3	279,5
Tensão na fase aberta Ter. 1	441,2	101,2	-77,1
Tensão na fase aberta Ter. 2	441,2	94,7	-78,5
Tensão no RN Ter. 1	41,5	29,2	-29,6
Tensão no RN Ter. 2	41,7	28,2	-32,5

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)..

Observa-se que o primeiro pico de TRT apresentou uma variação de 66,1% e a

Figura 22 – Tensão nos reatores de neutro da LT de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

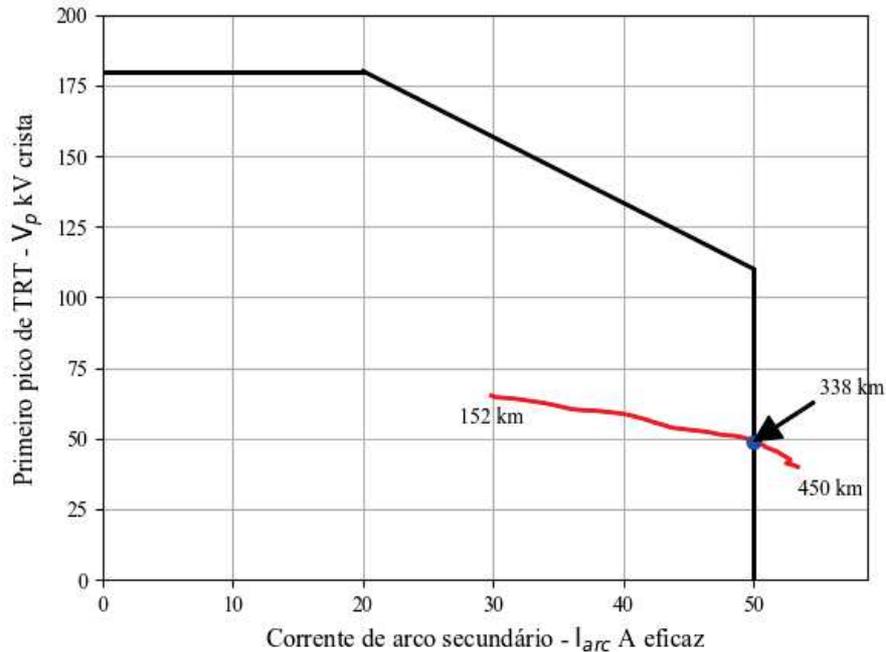
corrente de arco secundário de 279,5 % para uma variação de 196 % no comprimento da linha. Cabe ressaltar que o crescimento da intensidade do arco secundário dessa linha é bem superior ao apresentado para a linha de 230 kV analisada na seção anterior. Posto isso, quando maior o nível de tensão maiores serão os desafios para viabilizar o RAM segundo os critérios vigentes. Por outro lado, as variações das tensões induzidas na fase aberta e nos reatores de neutro foram negativas, atingindo uma redução de até -78,5 % para a tensão na fase aberta no terminal 2.

4.3.2 Análises considerando a variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV

Na seção anterior, o comprimento da linha foi variado e o valor dos reatores de compensação foi mantido fixo em 70 Mvar. Por conseguinte, para cada incremento na extensão da linha o percentual de compensação ficou menor em relação à sua condição inicial. Dessa forma, o efeito capacitivo foi superior e, conseqüentemente, a corrente de arco secundário apresentou uma elevação considerável. Neste contexto, na presente análise, os reatores de compensação serão variados juntamente com o comprimento da linha para manter constante o percentual de compensação. Como o comprimento da linha está aumentando, a potência dos reatores também aumentará para compensar o crescimento do efeito capacitivo. A partir dessas premissas, a Figura 23 apresenta o comportamento do par de valores V_p e I_{arc} também considerando a variação do comprimento da linha até

450 km mantendo o percentual de compensação fixo em 69%.

Figura 23 – Critério 1 - Variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

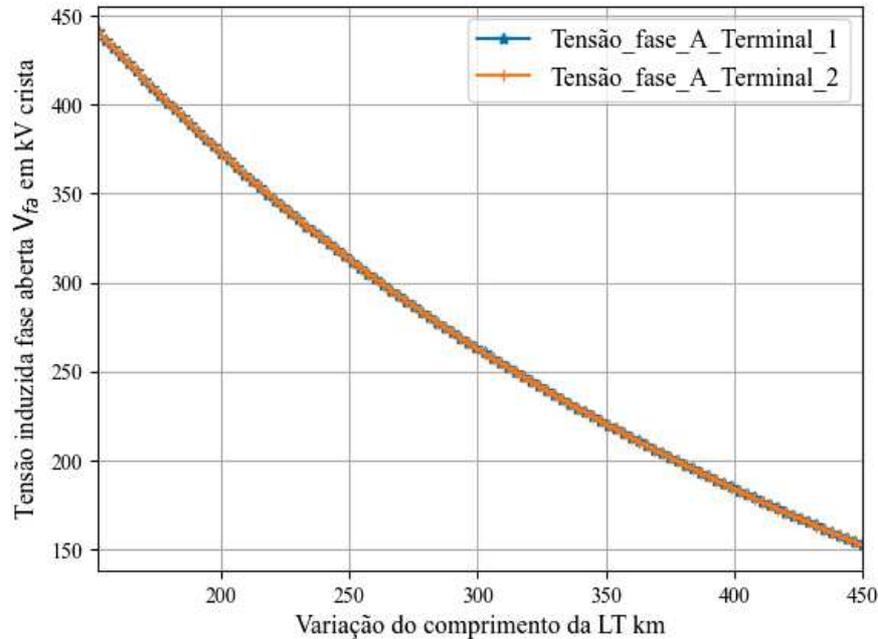
Observa-se que para este cenário, o comprimento máximo da linha que permite atender o primeiro critério foi de 338 km, bem superior ao comprimento máximo atingido de 230 km da análise anterior na qual houve apenas a variação do comprimento da linha. Dessa forma, verifica-se que variações na compensação influencia significativamente a viabilidade ou não do RAM e pode ser uma alternativa na busca de soluções para implementação dessa manobra desde que não acarrete problemas em outras condições operativas como, por exemplo, na energização da linha.

Em relação à tensão induzida na fase aberta, o máximo valor foi de 441,1 kV crista fase terra, conforme apresentado na Figura 24. Ressalta-se que de forma semelhante à análise anterior, a tensão induzida foi decrescendo a medida que o comprimento e a compensação da linha aumentava.

O comportamento da tensão induzida nos reatores de neutro está apresentada na Figura 25 e está adequado aos valores de suportabilidade geralmente adotados. No entanto, cabe ressaltar que nesta análise a tensão induzida nos reatores de neutro aumentou juntamente com o comprimento e a potência dos reatores de compensação ao contrário do apresentado na análise anterior.

A Tabela 9 apresenta as variações das grandezas monitoradas para essa linha considerando seu comprimento e reatores mínimos e máximos.

Figura 24 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 9 – Variação das grandezas em função do comprimento e reatores da LT de 500 kV.

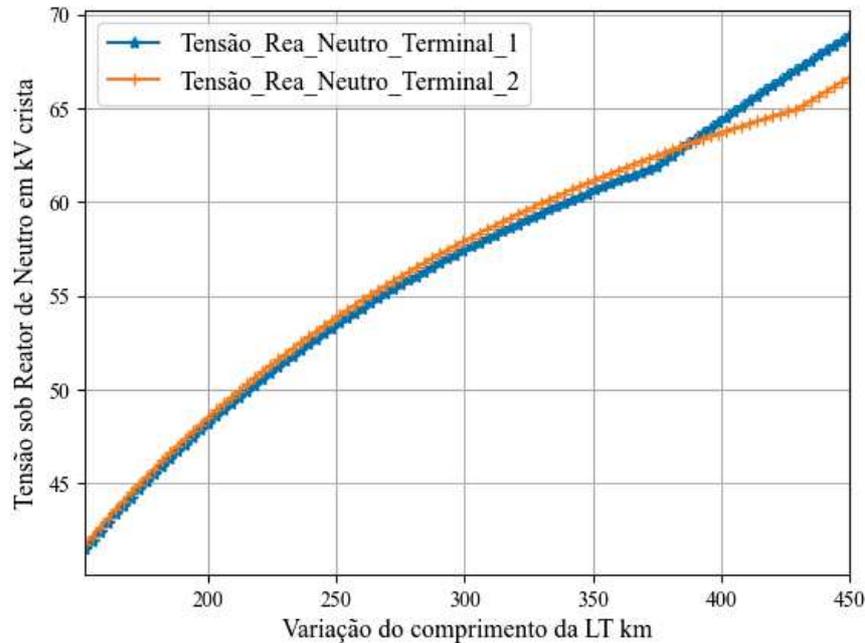
Variável ⁽¹⁾	LT 152		LT 450		Δ (%)
	km	RT	km	RT	
		70 Mvar		212 Mvar	
V_p		65,2		39,9	-38,7
I_{arc} [A]		29,8		53,4	78,9
Tensão na fase aberta Ter. 1		441,1		152,7	-65,4
Tensão na fase aberta Ter. 2		441,1		152,5	-65,4
Tensão no RN Ter. 1		41,5		68,9	66,1
Tensão no RN Ter. 2		41,7		66,7	59,8

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para este caso, o primeiro pico de TRT apresentou uma variação negativa de $-38,7\%$ e a corrente de arco secundário de $78,9\%$ considerando a mesma variação de 196% no comprimento da linha. Cabe ressaltar que mesmo para o comprimento máximo a corrente de arco secundário, embora tenha ultrapassado, está próxima do limite máximo de 50 A do primeiro critério. Para manter o percentual de compensação inicial, para a linha com 450 km foram necessários reatores de 212 Mvar .

Figura 25 – Tensão nos reatores de neutro em função da variação do comprimento e reatores da LT de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

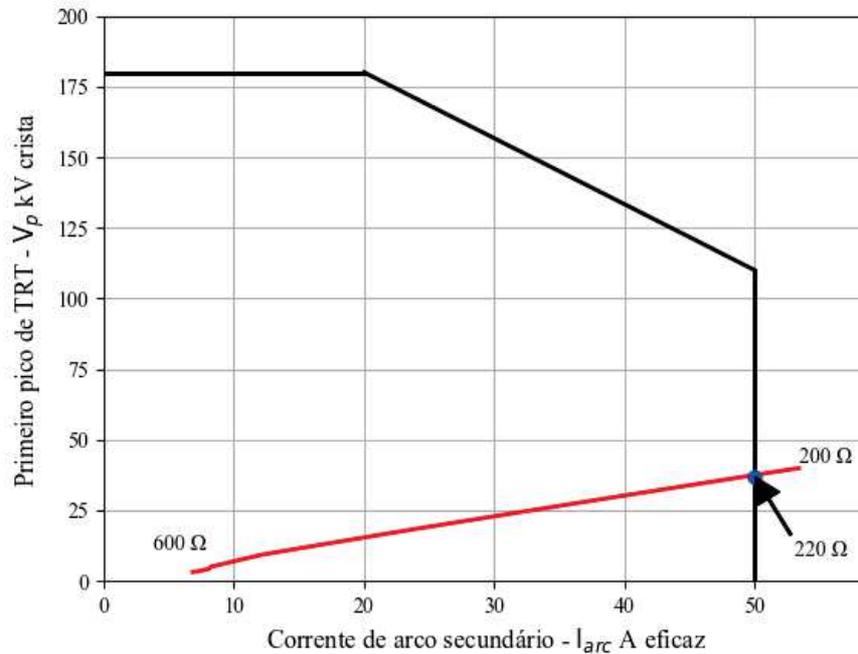
4.3.3 Análises considerando a variação do reator de neutro da LT 500 kV

Como previsto e apresentado, manter o percentual de compensação fixo ao aumentar o comprimento da linha trouxe resultados satisfatórios para a viabilidade do RAM. No entanto, dependendo da extensão da linha a variação do reator de compensação não é suficiente para viabilizar o RAM para o primeiro critério. Neste contexto, nesta seção serão apresentados os impactos da variação do valor do reator de neutro nas grandezas monitoradas.

Para condição inicial, foi considerado a linha com extensão de 450 km e compensação de 212 Mvar, isto é, último cenário da análise apresentada na Subseção 4.3.2. Dessa forma, a condição inicial caracteriza o pior cenário para viabilizar o RAM. A partir dessas premissas, o valor do reator de neutro em ambos os terminais da linha foi variado de 200 a 600 Ω . A influência dessa variação no par de valores V_p e I_{arc} está apresentada na Figura 26. A partir dos resultados, observa-se que a corrente de arco secundário apresentou uma redução praticamente linear em função do aumento do valor do reator de neutro. Para a presente linha, um pequeno incremento no reator de 200 para 220 Ω foi suficiente para colocá-la dentro a área do primeiro critério, comprovando a eficácia da utilização dessa solução para redução da corrente de arco secundário.

Para esta análise, como mostrado na Figura 27, a tensão induzida na fase aberta

Figura 26 – Critério 1 - Variação do reator de neutro da LT de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

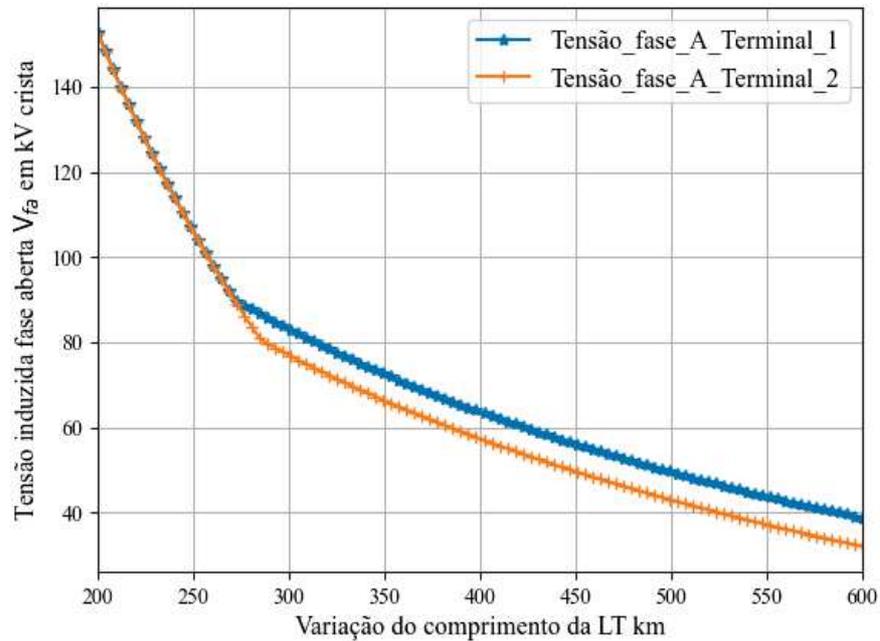
apresentou valores adequados em relação à suportabilidade da linha para toda faixa de reatores de neutro analisada. Além disso, ressalta-se que o aumento dos reatores a tensão induzida reduziu significativamente, isto é, o pico de ressonância continuou se afastando da faixa de frequência considerada nos estudos.

Em relação aos estudos de RAM, um dos fatores limitadores em aumentar o valor do reator de neutro é a tensão induzida nesse equipamento durante a manobra. Neste contexto, a Figura 28 apresenta que a tensão no reator de neutro aumenta juntamente a elevação de sua reatância. Ressalta-se que para reatores de 450 Ω a tensão induzida chega a 100 kV crista para o reator do terminal 1. A partir desses valores, torna-se necessário a utilização de equipamentos com suportabilidade superior a convencional do mercado de 72,5 kV eficazes equivalente a 102,5 kV crista.

Para consolidação dos resultados, a Tabela 10 apresenta as variações máximas das grandezas monitoradas. Observa-se que o primeiro pico de TRT apresentou uma variação de $-92,0\%$ e a corrente de arco secundário de $-87,2\%$ considerando o aumento de 200 para 600 Ω os reatores de neutro. Para o valor máximo do reator, o par de valores V_p e I_{arc} chegou a 3,2 kV e 6,8 A, respectivamente. Esse ponto está muito distante dos limites definidos no primeiro critério, logo nessa configuração a linha tem uma alta margem para outras variações.

Perante o exposto, o emprego desses equipamentos traz resultados satisfatórios

Figura 27 – Tensão da fase aberta em função do reator de neutro da LT de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 10 – Variação das grandezas em função do reator de neutro da LT de 500 kV.

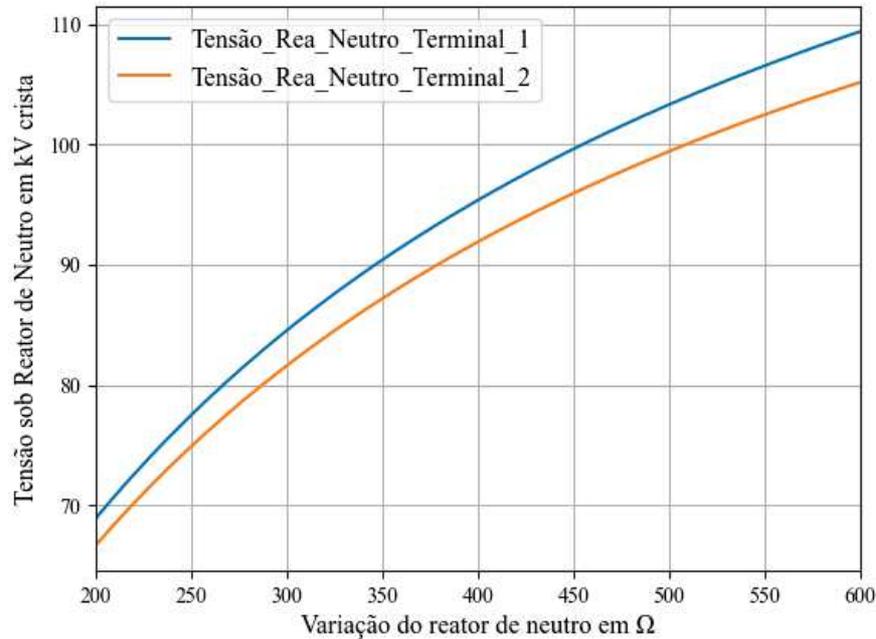
Variável ⁽¹⁾	RN 200 Ω	RN 600 Ω	Δ (%)
V_p	39,9	3,2	-92,0
I_{arc} [A]	53,4	6,8	-87,2
Tensão na fase aberta Ter. 1	152,7	38,8	-74,6
Tensão na fase aberta Ter. 2	152,5	32,0	-79,0
Tensão no RN Ter. 1	68,9	109,4	58,8
Tensão no RN Ter. 2	66,7	105,2	57,8

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

para viabilizar o RAM. No entanto, outras análises devem ser realizadas à medida que o valor do reator de neutro é elevado como, por exemplo, a própria tensão induzida nesse equipamento que neste caso atingiu valor de 109,4 kV ultrapassando a suportabilidade usualmente adotada para este equipamento de 102,5 kV crista.

Figura 28 – Tensão nos reatores de neutro da LT de 500 kV em função da variação de seu valor ôhmico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.4 ANÁLISE CONSIDERANDO SILHUETA TÍPICA DA LPNE DE 500 kV

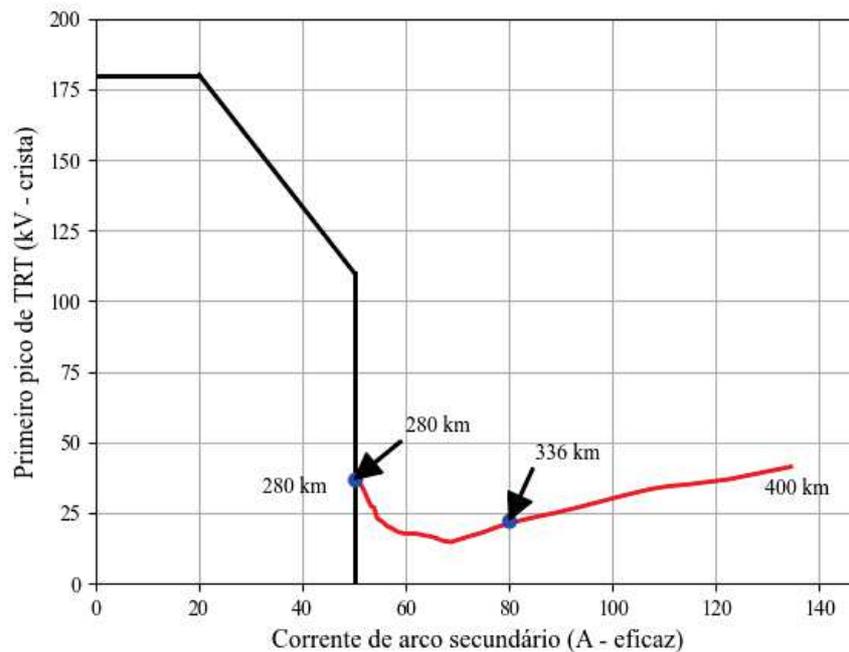
Nesta seção serão apresentados os estudos considerando uma linha de 500 kV de potência natural elevada com estrutura típica *cross rope* cujas características elétricas e geométricas estão detalhadas no Apêndice A. A linha considerada no presente trabalho possui 6 condutores por fase com formação assimétrica entre as fases e a utilização dessa configuração objetiva aumentar a capacitância da linha, reduzir a impedância característica e maximizar a capacidade de transmissão de energia. Além disso, busca-se a aproximação dos feixes das fases para aumentar a indutância mútua, linha compacta, isso também se reflete no aumento da potência natural equivalente. Por essa característica, a LPNE tem se tornado cada vez mais comum nas soluções do planejamento da EPE para otimizar a transmissão de potência que pode chegar a 1670 MW por circuito. No entanto, a compactação, dentre outros fatores, é limitada pela coordenação do isolamento entre fases e os gradientes máximos de campo elétrico que irão ocorrer na superfície dos condutores (PAGANOTTI, 2012; PINHEIRO; TAVARES, 2009).

Devido às características supracitadas, a LPNE geralmente apresenta elevados acoplamentos capacitivos que potencializam a corrente de arco secundário trazendo grandes desafios para viabilização do RAM.

4.4.1 Análises considerando a variação do comprimento da LPNE de 500 kV

Na presente análise, nas condições iniciais, a LPNE de 500 kV possui extensão de 337 km, reatores de compensação em seus terminais de 235 Mvar e reatores de neutro de 800Ω . Nessas condições, o valor da corrente de arco secundário é de 80,3 A e o primeiro pico de TRT de 21,4 kV. Observe que já para as condições de projeto da linha o primeiro critério considerado no RAM não é atendido visto que sua corrente máxima permitida é de 50 A. Neste contexto, a fim de buscar configurações que atendam ao primeiro critério, foram simulados cenários considerando o comprimento inicial da linha de 280 km até 400 km. A partir dessas premissas, o comportamento do par de valores V_p e I_{arc} está mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Critério 1 - Variação do comprimento da LPNE de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

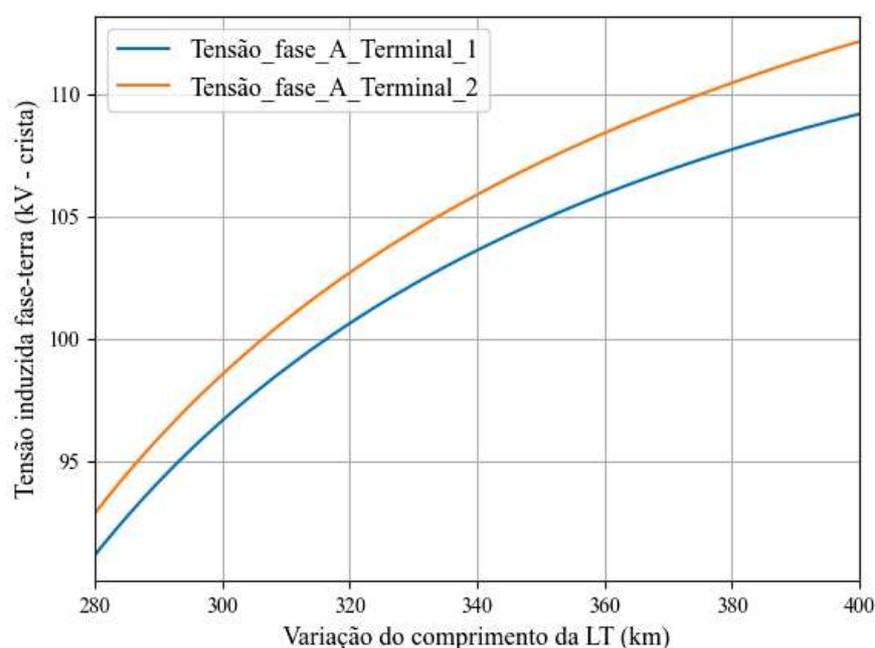
Observa-se que para o valor da extensão da linha de 280 km o primeiro critério é atendido, enquanto que para comprimentos superiores a corrente de arco secundário excede 50 A atingindo 134,5 A para o comprimento de 400 km. Dessa forma, para a LPNE o segundo critério também será utilizado visto que o primeiro é atendido em apenas um cenário simulado.

Conforme apresentado na Seção 2.4, a viabilidade do RAM considerando o segundo critério é determinada apenas utilizando o valor da intensidade da corrente de arco secundário. Além disso, a partir do valor da corrente de arco secundário o tempo morto é definido conforme gráfico apresentado na Figura 6. Nesta primeira análise a LPNE atende

ao segundo critério para um comprimento de até 336 km.

Em relação às análises na frequência, a tensão induzida na fase aberta aumentou à medida que o comprimento da linha foi incrementado. No entanto, apresenta valores abaixo da suportabilidade da linha 489,89 kV crista para todos os cenários simulados, conforme mostrado na Figura 30. Dessa forma, não há indicação de picos de ressonância para essa linha na faixa de frequência considerada e a tensão induzida não é um fator limitante para o RAM.

Figura 30 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento da LPNE de 500 kV.

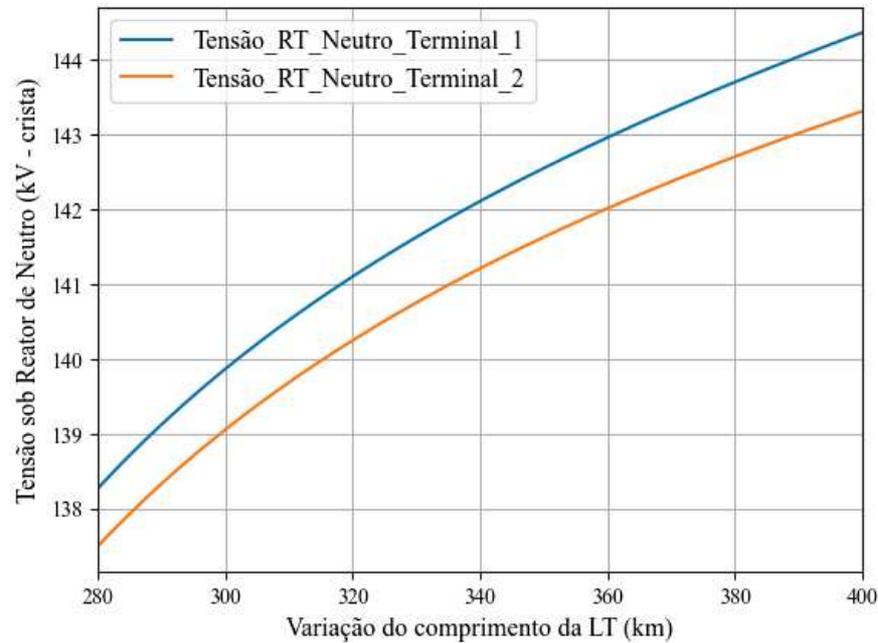


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O comportamento da tensão induzida nos reatores de neutro está apresentado na Figura 31. Observa-se que para todos os comprimentos da linha analisados há indicação da necessidade de utilização de reatores de neutro com suportabilidade superior ao valor padronizado. Nesses casos, geralmente são empregados equipamentos com tensão nominal de 145 kV eficazes.

Por fim, a Tabela 11 sintetiza as máximas variações da presente análise. O valor do comprimento de 280 km foi determinado para que a linha atendesse ao primeiro critério. Ressalta-se que a compensação foi mantida fixa. Desse modo, para comprimentos da linha abaixo da nominal, o percentual de compensação foi superior ao inicial. Por exemplo, para o comprimento mínimo da linha de 280 km, os reatores de 235 Mvar representaram um percentual de compensação de 76,7% enquanto o percentual de compensação nominal da linha é de 63,5%. Como já mostrado nas seções anteriores, o aumento da compensação da

Figura 31 – Tensão nos reatores de neutro da LPNE de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 11 – Variação das grandezas em função do comprimento da LPNE de 500 kV.

Variável ⁽¹⁾	LT 280 km comp. de 76,7 %	LT 400 km comp. de 53,1 %	Δ (%)
V_p	36,8	41,4	12,4
I_{arc} [A]	50,0	134,5	168,4
Tensão na fase aberta Ter. 1	91,1	109,2	19,8
Tensão na fase aberta Ter. 2	92,8	112,2	20,8
Tensão no RN Ter. 1	138,3	144,4	4,4
Tensão no RN Ter. 2	137,5	143,3	4,2

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

linha favorece a redução da corrente de arco secundário e, conseqüentemente, a viabilização do RAM.

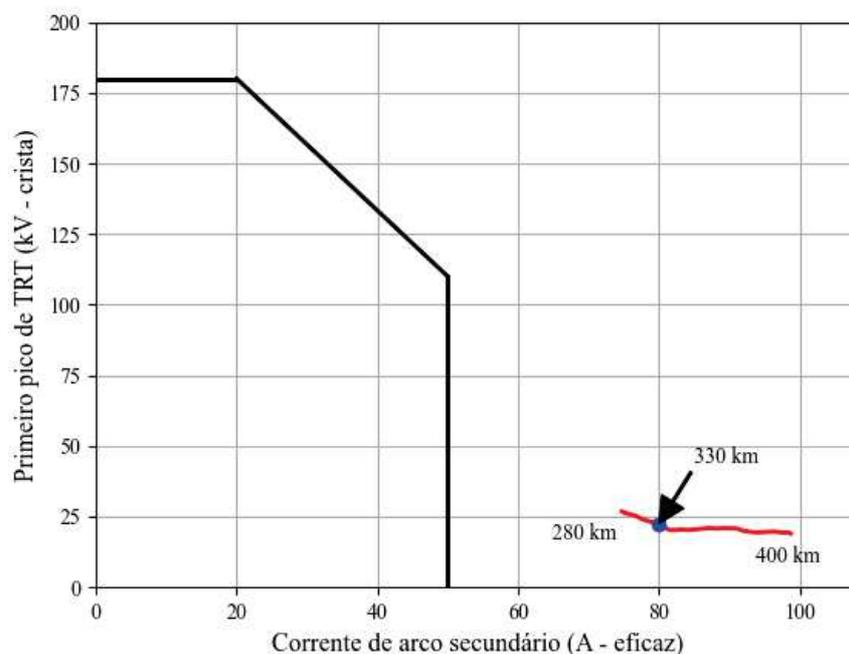
Em relação às variações das grandezas monitoradas, observa-se que a corrente de arco secundário atingiu valores muito superiores ao limite do primeiro critério com um crescimento de 168,6%. Por outro lado, as tensões induzidas nos reatores de neutro, o primeiro pico de TRT e as tensões induzidas na fase aberta apresentam comportamento

adequado para todos os casos com baixas variações nos casos analisados. Diante do exposto, fica evidenciado que existem desafios significativos na implementação do RAM para LPNE no que se refere ao primeiro critério. Nas seções subsequentes, serão realizadas análises a fim de reduzir a intensidade da corrente de arco secundário na busca de soluções que maximizem a probabilidade de sucesso do RAM.

4.4.2 Análises considerando a variação do comprimento e reatores da LPNE de 500kV

Complementando os resultados da Subseção 4.4.1, na presente análise o comprimento da linha foi variado mantendo o percentual nominal de compensação fixo em 63,5%. Dessa forma, para os comprimentos inferiores ao nominal de 337 km os reatores serão menores comparados a seus valores nominais de 235 Mvar. Nestas condições, o comportamento do par de valores V_p e I_{arc} está apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Critério 1 - Variação do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.



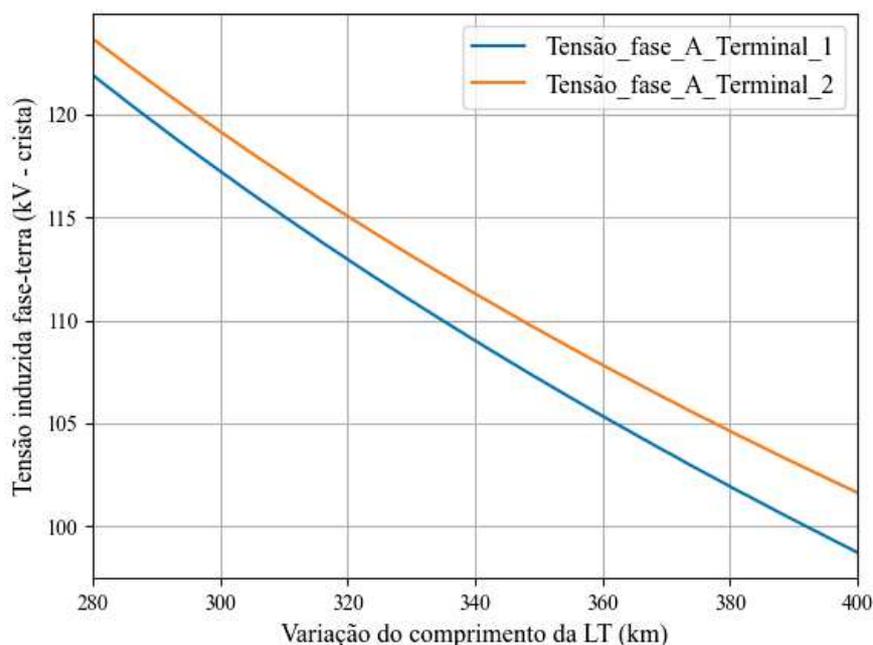
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nota-se que para os cenários considerando valores de comprimento inferiores ao nominal, os resultados se deterioraram, se comparados aos da Subseção 4.4.1. Para a extensão mínima da linha de 280 km o valor da corrente de arco secundário foi de 74,8 A não atendendo ao primeiro critério. Por outro lado, para comprimentos superiores ao nominal os resultados dessa análise melhoraram proporcionando uma corrente de 98,7 A para o comprimento de 400 km contra 134,5 A da Subseção 4.4.1. Considerando o segundo

critério, o RAM é viável para a LPNE com comprimento de até 330 km que corresponde a máxima corrente de 80 A admitida por esse critério.

Para os resultados na frequência, a tensão induzida na fase aberta apresenta valores adequados para toda faixa de extensão analisada atingindo o valor máximo de 123,7 kV crista, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Tensão da fase aberta em função da variação do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.

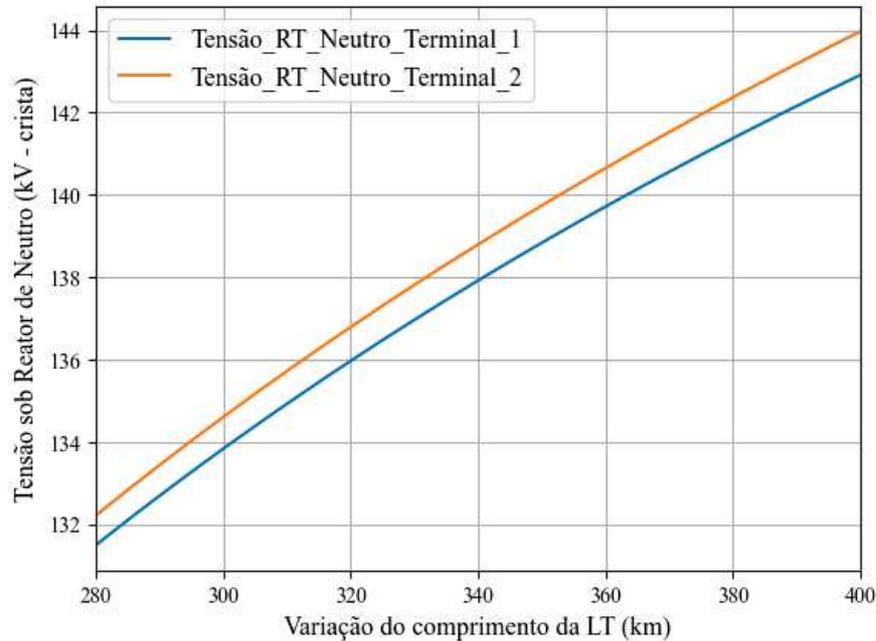


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por sua vez, o comportamento da tensão induzida nos reatores de neutro está apresentado na Figura 34. Manter o percentual de compensação fixo não trouxe grandes influências para as tensões induzidas nos reatores de neutro sendo ainda necessário a adoção de equipamentos com suportabilidade superior ao valor padronizado, geralmente, com tensão nominal de 145 kV eficazes.

A Tabela 12 apresenta as máximas variações das grandezas monitoradas. Destaca-se que para essa análise a variação da corrente de arco secundário foi de 32,1 % muito inferior à variação de 168,4 % da análise anterior que não considerou a variação dos valores absolutos dos reatores apresentada na Subseção 4.4.1. Além disso, houve uma redução significativa de 29 % no primeiro pico de TRT. As tensões na fase aberta também decresceram e as tensões nos reatores de neutro tiveram um pequeno aumento de no máximo 8,9 %.

Figura 34 – Tensão nos reatores de neutro em função da variação do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 12 – Variação das grandezas em função do comprimento e reatores da LPNE de 500 kV.

Variável ⁽¹⁾	LT 280		LT 400		Δ (%)
	km	RT	km	RT	
		194 Mvar		280 Mvar	
V_p		26,8		19,0	-29,0
I_{arc} [A]		74,8		98,7	32,1
Tensão na fase aberta Ter. 1		123,7		101,6	-17,8
Tensão na fase aberta Ter. 2		121,9		98,7	-19,0
Tensão no RN Ter. 1		132,2		144,0	8,9
Tensão no RN Ter. 2		131,5		142,9	8,7

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

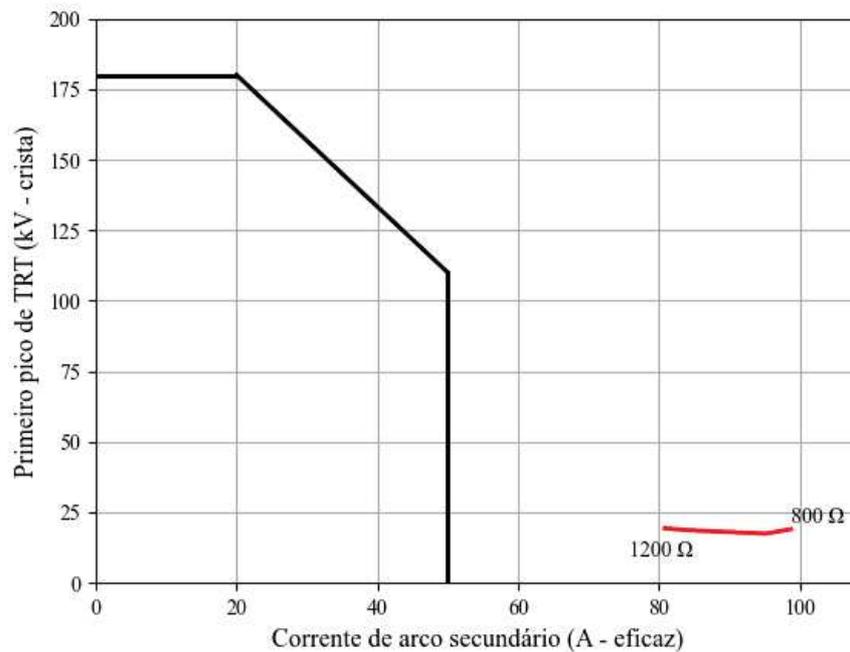
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.4.3 Análises considerando a variação do reator de neutro da LPNE de 500 kV

A alteração na compensação tem impacto direto na capacitância total da linha que, por sua vez, tem forte influência na indução da corrente de arco secundário. Dessa forma, o grau de compensação pode auxiliar na viabilização do RAM, conforme resultados

apresentados na Subseção 4.4.1 e Subseção 4.4.2. No entanto, para a LPNE a intensidade da corrente de arco secundário ainda é muito alta fazendo com que a presente linha não atenda o primeiro critério em praticamente todos os cenários analisados. Neste contexto, na presente análise serão avaliados os impactos da variação no reator de neutro no RAM da LPNE de 500 kV. Para condição inicial, será adotado o último cenário da Subseção 4.4.2, isto é, linha com extensão de 400 km e compensação de 280 Mvar que resulta na condição mais desafiadora para viabilização da manobra. A partir dessas premissas, o valor do reator de neutro em ambos os terminais da linha foi variado de 800 a 1200 Ω . Os resultados dessa variação no par de valores V_p e I_{arc} estão apresentados na Figura 35.

Figura 35 – Critério 1 - Variação do reator de neutro da LPNE de 500 kV.

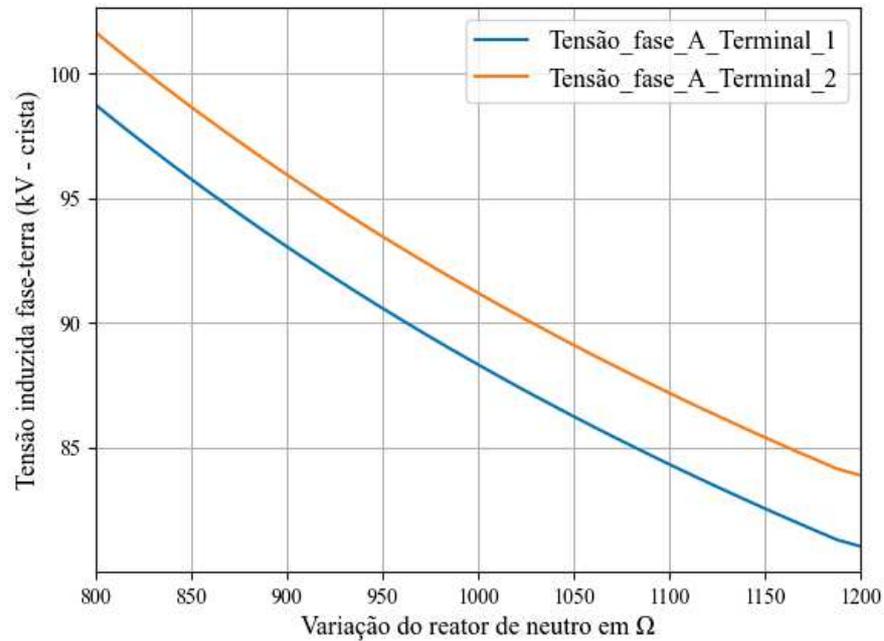


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Percebe-se que a corrente de arco secundário apresentou uma redução significativa em função do aumento do valor do reator de neutro. No entanto, mesmo para o valor máximo do reator de neutro o valor da corrente de arco secundário atingiu a marca de 80,7 A, ainda muito superior ao limite máximo permitido do primeiro critério e também acima do limite aceitável para o segundo critério resultando na inviabilidade de empregar o RAM para a LPNE com extensão de 400 km.

A tensão induzida na fase aberta apresentou valores adequados para toda faixa dos valores dos reatores de neutro estudada, conforme mostrado na Figura 36. Por sua vez, a tensão nos reatores de neutro aumenta à medida que o valor do reator de neutro é elevado, conforme resultados apresentados na Figura 37.

Figura 36 – Tensão da fase aberta em função do reator de neutro da LPNE de 500 kV.



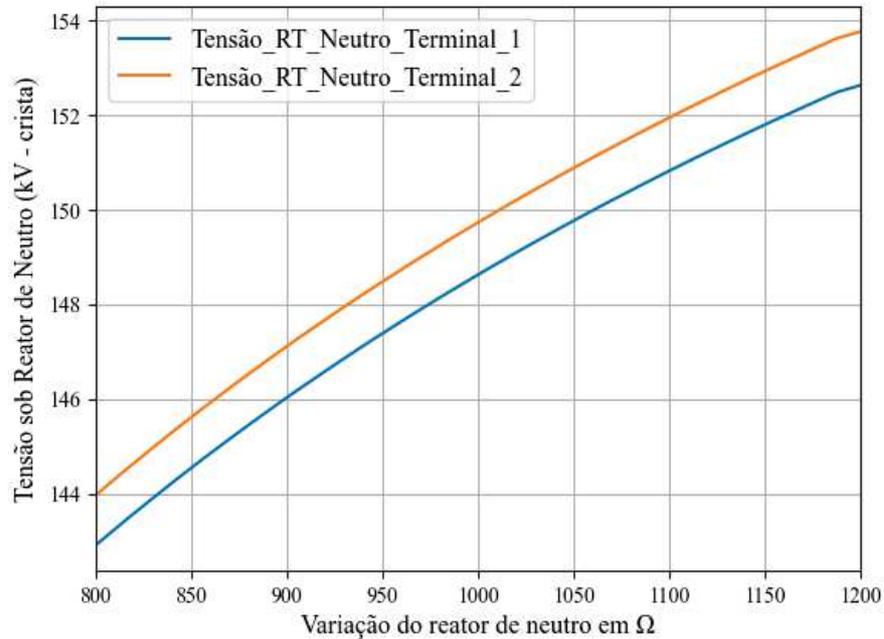
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela 13 apresenta as máximas variações observadas nas análises. O primeiro pico de TRT sofreu uma variação de apenas 1,7% e permaneceu muito abaixo dos limites da área do primeiro critério. O aumento do reator de neutro não teve influência significativa na tensão induzida neste equipamento que atingiu o máximo de 144,4 kV crista. No entanto, em todos os cenários foi evidenciada a necessidade de utilizar reatores com suportabilidade de 145 kV eficazes. Já as tensões induzidas na fase aberta atingiram uma redução de até 18,1% mantendo-se em valores dentro da suportabilidade da linha.

Por fim, o aumento do reator de neutro para 1200 Ω fez com que a corrente de arco secundário apresentasse uma redução de 18,3% chegando a 80,7 A. Embora a redução seja significativa diante desse resultado, fica evidente os desafios da viabilização do RAM da linha visto que aumentar ainda mais o valor do reator de neutro não traz grandes reduções no arco secundário e pode agravar outros problemas associados ao desaterramento local do sistema como maiores sobretensões nas manobras.

A partir dos resultados apresentados, considerando as mesmas análises realizadas para a linha de 500 kV convencional para LPNE os critérios considerados para o RAM foram atendidos para poucos cenários e para o comprimento máximo da linha nem a elevação do reator de neutro foi suficiente para viabilizar a manobra pelo menos para o segundo critério. Desse modo, na próxima seção será apresentada uma abordagem que visa uma representação mais precisa das estruturas utilizadas em uma LPNE como realmente

Figura 37 – Tensão nos reatores de neutro da LPNE de 500 kV em função da variação de seu valor ôhmico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 13 – Variação das grandezas em função do reator de neutro da LPNE de 500 kV.

Variável ⁽¹⁾	RN 800 Ω	RN 1200 Ω	Δ (%)
V_p	19,0	19,4	1,7
I_{arc} [A]	98,7	80,7	-18,3
Tensão na fase aberta Ter. 1	101,6	83,8	-17,6
Tensão na fase aberta Ter. 2	98,7	80,9	-18,1
Tensão no RN Ter. 1	144,0	153,8	6,9
Tensão no RN Ter. 2	142,9	152,7	6,8

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

implantada em campo e os impactos nas grandezas monitoradas no RAM.

4.4.4 Análises considerando a utilização das estruturas autoportantes na LPNE de 500 kV

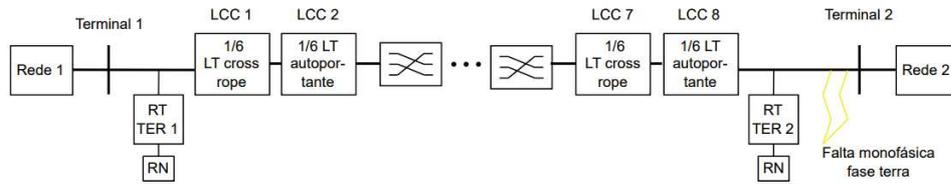
Para simplificação dos estudos, o cálculo dos parâmetros da linha considera a estrutura típica, geralmente, a com maior recorrência e os parâmetros elétricos e disposições geométricas dos cabos associados. No entanto, devido a necessidades elétricas e mecânicas,

em uma linha de transmissão real são utilizados diversos tipos de estruturas disposições geométricas dos cabos distintas em sua extensão. Por exemplo, há estruturas destinadas à suspensão dos cabos, estruturas de ancoragem que são utilizadas quando há maiores esforços mecânicos, estruturas específicas para realizar a transposição entre as fases. Neste contexto, ressalta-se que a implantação da estrutura *cross rope* apresentada na Figura 46 depende de várias condições como, por exemplo, o relevo do ponto de instalação que deve ser favorável devido às suas características mecânicas e seus longos estais. Dessa forma, dependendo da região onde a linha será construída é necessário implantar, como solução alternativa à estrutura *cross rope*, estruturas autoportantes como, por exemplo, a apresentada na Figura 48. Desse modo, os parâmetros elétricos da linha são alterados juntamente com o valor do *Surge Impedance Loading* (SIL), isto é, a potência natural, em MW, da LPNE.

Perante ao exposto, no ato de licitação e publicação do edital, a ANEEL já estabelece que as estruturas utilizadas em uma linha de transmissão devem ser projetadas de acordo com a configuração dos feixes dos condutores e a geometria das fases e dos cabos para-raios, seguindo o padrão de referência estabelecido nos relatórios de planejamento da EPE. No entanto, o edital aceita variações que garantam um SIL equivalente mínimo definido em edital para cada linha. Desse modo, o leilão estabelece que deve ser realizada uma verificação do SIL com base em uma estimativa da distribuição de frequência das estruturas da série, considerando o relevo do terreno onde a linha será implantada, ou utilizando informações de outras linhas de transmissão com grau de compactação semelhante nas proximidades. Após a implantação efetiva das características técnicas das estruturas, será necessário comprovar o SIL com base no número real de cada tipo de estrutura utilizado. Essas diretrizes estão presentes no anexo técnico de cada lote licitado que tenha em seu escopo uma ou mais LPNE, como por exemplo o lote 02 do leilão Nº 01/2020 (ANEEL, 2020).

Nesta análise, será avaliada a influência da utilização de estruturas alternativas a *cross rope* nas linhas de SIL elevado. Para tal fim, a linha foi modelada no ATP através de 8 trechos de LCC respeitando o ciclo de transposição de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6, conforme apresentado na Figura 38. Cada trecho do ciclo de transposição contém dois LCC: um com a modelagem da silhueta *cross rope* e um com a silhueta autoportante ambos com as respectivas porcentagens da extensão de cada ciclo. Por exemplo, o primeiro cenário analisado irá considerar a utilização de 5% de estruturas autoportantes. Dessa forma, o LCC 1, que correspondente à estrutura *cross rope* cujas características geométricas estão apresentadas na Figura 46, terá o comprimento correspondente a 95% e o LCC 2, que correspondente à estrutura autoportante cujas características geométricas estão apresentadas na Figura 48, terá o comprimento correspondente 5% do primeiro trecho da transposição que corresponde a 1/6 do comprimento total da linha. Essa lógica se repetirá para os demais trechos até completar o ciclo de transposição e a extensão total da linha.

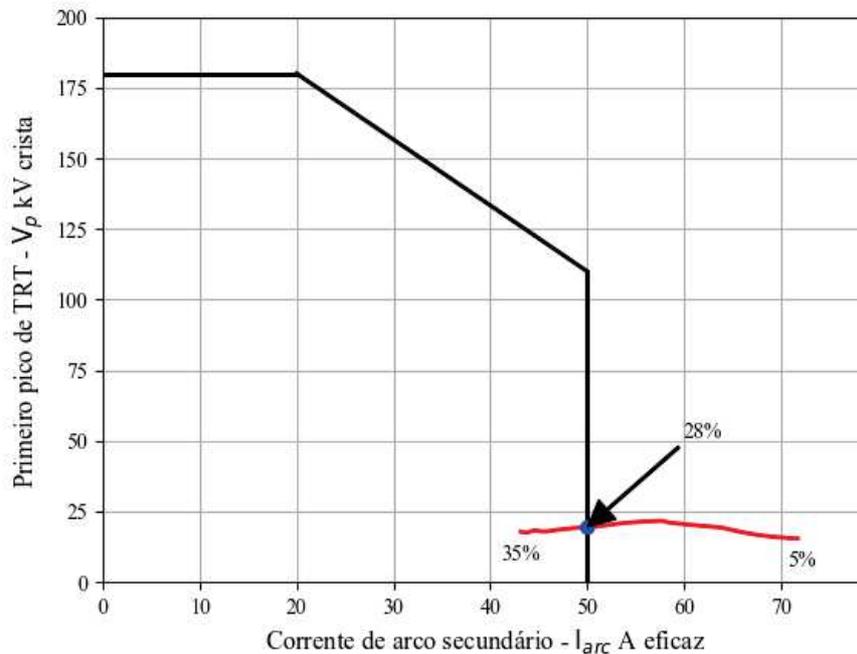
Figura 38 – Diagrama da modelagem da linha considerando duas estruturas típicas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para as condições iniciais será considerado o último cenário simulado na Subseção 4.4.3, isto é, a LPNE com extensão de 400 km e compensação de 280 Mvar contando com reatores de neutro de 1200Ω em seus terminais. A partir destas premissas, o valor da porcentagem de utilização da estrutura autoportante foi variado de 5% a 35%. Os impactos dessa variação no par de valores V_p e I_{arc} estão apresentados na Figura 39.

Figura 39 – Critério 1 - Variação da porcentagem de estruturas autoportantes na LPNE de 500 kV.

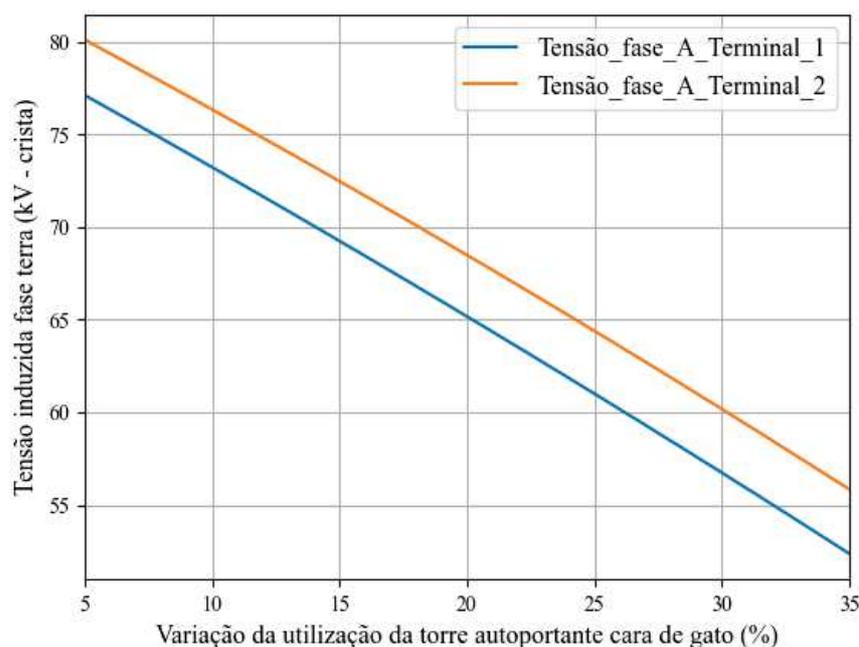


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os resultados apresentam que a corrente de arco secundário sofreu uma redução significativa em função da presença das estruturas autoportantes na LPNE. Para a porcentagem de 28% o arco secundário atingiu 49,8 A colocando a linha com esta configuração dentro da área atendendo ao primeiro critério. Além disso, cabe ressaltar que o segundo critério passou a ser atendido para todos os cenários analisados uma vez que a máxima corrente de arco encontrada foi de 71,8 A.

As simulações na frequência indicaram que a tensão induzida na fase aberta apresentou valores adequados para todos os cenários analisados, conforme mostrado na Figura 40. Além disso, cabe ressaltar que a tensão induzida reduziu significativamente atingindo uma variação de 39,8 % para o terminal 1.

Figura 40 – Tensão da fase aberta da LPNE de 500 kV em função da variação a porcentagem de estruturas autoportantes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

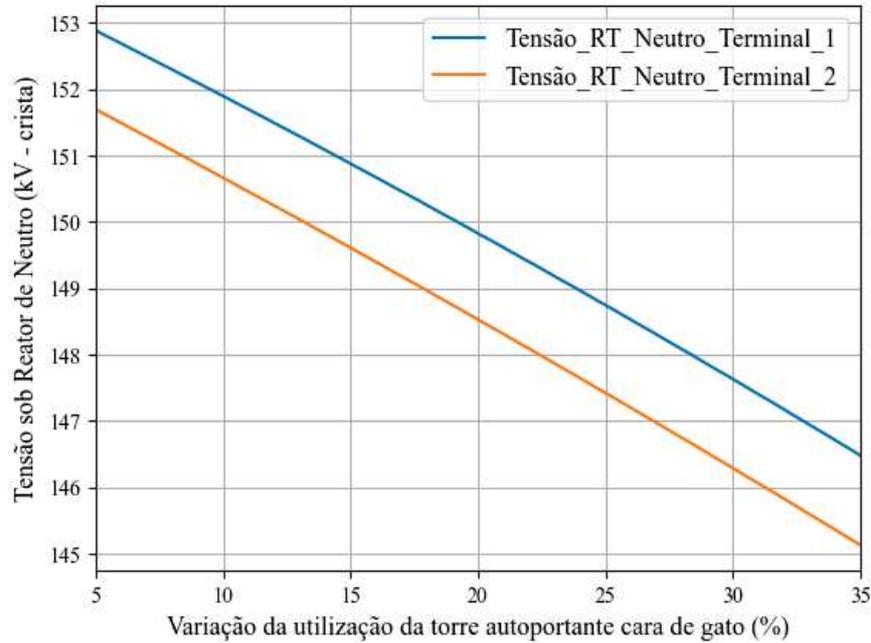
Por fim, o comportamento da tensão nos reatores de neutro também reduziu com a representação das estruturas autoportantes como está apresentado na Figura 41.

Para sintetizar os resultados, a Tabela 14 apresenta as máximas variações das análises realizadas na presente seção. Essa abordagem permite representar com maior fidedignidade a presença de diferentes estruturas ao longo da linha e trouxe impactos significativos nas avaliações de viabilidade do RAM.

4.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados apresentados neste capítulo mostraram o comportamento e os desafios da viabilidade do RAM para as linhas de 230 kV e 500 kV convencionais e de potência natural elevada. Ressalta-se que a implementação do RAM na LPNE se mostrou mais desafiador. No entanto, a modelagem mais precisa das torres utilizadas na extensão desta linha traz cenários melhores que atendem os critérios estabelecidos.

Figura 41 – Tensão nos reatores de neutro da LPNE de 500 kV em função da variação a porcentagem de estruturas autoportantes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 14 – Variação das grandezas em função da porcentagem das estruturas autoportantes na LPNE de 500 kV.

Variável ⁽¹⁾	5 % de autopor- tantes	35 % de autopor- tantes	Δ (%)
V_p	15,5	17,8	15,3
I_{arc} [A]	71,8	43,2	-39,8
Tensão na fase aberta Ter. 1	80,1	55,8	-30,3
Tensão na fase aberta Ter. 2	77,1	52,4	-32,1
Tensão no RN Ter. 1	151,7	145,1	-4,3
Tensão no RN Ter. 2	152,9	146,5	-4,2

⁽¹⁾ Valores das tensões estão em kV crista.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em relação parâmetros variados, destaca-se que o aumento do comprimento total eleva a corrente de arco secundário em todos os cenários simulados. O grau de compensação, o valor do reator de neutro e as estruturas utilizadas na modelagem da linha apresentam influência significativa nas grandezas monitoradas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões acerca da metodologia utilizada e resultados alcançados e propõe trabalhos futuros para continuação da presente dissertação.

5.1 CONCLUSÕES

Os estudos de transitórios eletromagnéticos que balizam as análises de viabilidade do Religamento Automático Monopolar (RAM) e as propostas de soluções com objetivo de minimização da corrente de arco secundário compõem uma importante etapa do projeto básico das novas linhas de transmissão. Neste contexto, a metodologia proposta baseada em algoritmos implementados em Python permite, de forma automatizada, a identificação e alteração de parâmetros da linha e do sistema em estudo, a execução do ATP para cada novo caso gerado e a interpretação e armazenamento dos resultados. Para as simulações no domínio do tempo, o algoritmo identifica e armazena o último pico da corrente de arco secundário que ocorre em seu último semiciclo e o primeiro pico da TRT que ocorre em seu primeiro semiciclo após a extinção da corrente. Para as análises no domínio da frequência, são identificadas e armazenadas as máximas tensões no espectro de frequência considerado.

A estratégia apresentada facilita a análise de múltiplos cenários e a busca por alternativas que potencializam a probabilidade de sucesso do RAM. O objetivo principal do trabalho foi alcançado através da utilização da metodologia apresentada para realizar as análises de sensibilidade dos impactos das variações sistêmicas nas grandezas monitoradas nos estudos do RAM.

Ao longo da dissertação foram avaliadas variações em parâmetros que comumente sofrem alterações durante o projeto de uma nova linha. Por exemplo, pode ser necessária a alteração do traçado da linha devido a questões geográficas e fundiárias e, conseqüentemente, o comprimento, a compensação reativa, a estrutura típica que compõem a linha e o valor do reator de neutro também podem ser alterados para atender à nova configuração. Além disso, cabe ressaltar que a metodologia supracitada permite a alteração de quaisquer outros parâmetros modelados nos cartões de entrada do ATP além dos analisados no presente trabalho.

Em relação aos resultados obtidos, pôde-se observar que, para todas as linhas analisadas, o aumento do comprimento total e, conseqüentemente, da susceptância de carregamento, eleva significativamente a corrente de arco secundário. Além disso, esse efeito se intensifica no nível de tensão de 500 kV principalmente na Linha de Potência Natural Elevada (LPNE) enquanto para a linha de 230 kV não se observou dificuldades para se atender os critérios mesmo para o comprimento máximo simulado.

As análises realizadas também apresentam que alterações no percentual de compensação reativa pode viabilizar ou não o RAM em determinadas configurações de linhas e, caso não afete outras manobras e condições operativas, pode ser uma solução para atender os critérios estabelecidos. Caso não seja possível alterar os reatores de compensação ou em cenários nos quais essas variações não foram suficientes para viabilizar o RAM, adotou-se o emprego dos reatores de neutro que se mostrou eficiente na redução da corrente de arco secundário em todos os cenários apresentados neste trabalho.

As soluções supracitadas foram suficientes para viabilizar a manobra nas linhas de 230 kV e de 500 kV convencionais. No entanto, para a LPNE os desafios foram muito maiores exigindo uma representação mais precisa das estruturas utilizadas nesses empreendimentos. Dessa forma, a última seção mostrou que considerar a utilização de estruturas autoportantes na modelagem da linha reduz significativamente a corrente de arco secundário e, dependendo da porcentagem de sua utilização, o RAM pode ser viabilizado.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para continuação do trabalho apresentado e com intuito de investigar os impactos das variações sistêmicas nos critérios atuais de viabilidade do RAM, propõe-se as seguintes análises futuras:

- Avaliar os impactos de variações na rede externa no RAM como, por exemplo, nos níveis de curto-circuito considerados;
- Avaliar cenários com linhas acopladas eletromagneticamente. Através da metodologia apresentada, variar a porcentagem do comprimento da linha que possui algum paralelismo e os impactos no RAM;
- Incluir a modelagem do arco elétrico nas análises apresentadas, variando seus parâmetros e os impactos nos resultados;
- Estender a avaliação considerando outros níveis de tensão e outras estruturas típicas consideradas nas linhas de transmissão;
- Variar outros parâmetros sistêmicos como, por exemplo, o carregamento da linha;
- Avaliar a possibilidade de integração da metodologia proposta para avaliar e comparar o desempenho das técnicas de religamento monopolar adaptativo;
- Incluir o desenvolvimento de métodos de otimização para analisar variações em mais de um parâmetro simultaneamente de forma a viabilizar o RAM;
- Realizar uma avaliação estocástica na variação de terminados parâmetros como, por exemplo, o instante de extinção do arco;

- Empregar a metodologia apresentada para outros estudos de projeto básico, como manobras de linhas de transmissão e de transformadores. Por exemplo, avaliar os impactos da variação da reatância de núcleo de ar e/ou a curva de saturação na corrente de energização e nas sobretensões durante a energização de um transformador;

REFERÊNCIAS

- ABBASI, E.; SEYEDI, H.; STRUNZ, K. Simulation and analysis of the effect of single-pole auto-reclosing on HV transmission lines switching overvoltages. In: *IEEE. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2009. p. 1–9.
- ADLY, A. R.; SEHIEMY, R. A. E.; ABDELAZIZ, A. Y. An optimal/adaptive reclosing technique for transient stability enhancement under single pole tripping. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 151, p. 348–358, 2017.
- AHN, S.-P. et al. An alternative approach to adaptive single pole auto-reclosing in high voltage transmission systems based on variable dead time control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 16, n. 4, p. 676–686, 2001.
- ANEEL. *Anexo 2-02 do Lote 02 do Leilão nº 01/2020*. 2020. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_transmissao/documentos/Anexo_2-02_Lote_02_Leil%C3%A3o_01_2020.pdf>.
- AQUINO, A. F. da C.; MASSAUD, A. G.; GONÇALVES, D. do N. Utilização do religamento automático tripolar lento em linhas de transmissão do SIN-Sistema Interligado Nacional: uma experiência bem sucedida. *XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, 2009.
- ARAÚJO, R. de M. et al. *Estudo de extinção de arco secundário no religamento monopolar de linhas de extra-alta tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- BABU, G.; RAMESH, M. V. Secondary arc extinction of single pole auto-reclosing on EHV transmission lines with shunt compensation reactors. In: *2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 52–58.
- BALOSI, 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.n.], 1966.
- BOISSEAU, A.; WYMAN, B.; SKEATS, W. Insulator flashover deionization times as a factor in applying high-speed reclosing circuit breakers. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 68, n. 2, p. 1058–1067, 1949.
- 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 (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2018.
- DIAS, O. F. D. R. *Implementação do religamento monopolar adaptativo rápido baseado na assinatura harmônica de tensão no simulador digital em tempo real (RTDS)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- DUDURYCH, I. M.; GALLAGHER, T.; ROSOLOWSKI, E. Arc effect on single-phase reclosing time of a UHV power transmission line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 2, p. 854–860, 2004.

- GODA, Y. et al. Forced extinction characteristics of secondary arc on UHV (1000 kV class) transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3, p. 1322–1330, 1993.
- GODOY, E. et al. Tutorial on single-pole tripping and reclosing. In: *Western Protective Relay Conference*. Washington: [s.n.], 2012. p. 1–21.
- HAUBRISH, H. *Single-phase autoreclosing in EHV systems*. Paris: CIGRE, 1974.
- KHODADADI, M.; NOORI, M. R.; SHAHRTASH, S. M. A noncommunication adaptive single-pole autoreclosure scheme based on the ACUSUM algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 4, p. 2526–2533, 2013.
- KIMBARK, E. W. Suppression of ground-fault arcs on single-pole-switched EHV lines by shunt reactors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 83, n. 3, p. 285–290, 1964.
- Leuven EMTP Center. *Alternative Transients Program (ATP): Rule Book*. [S.l.]: Leuven EMTP Center, 1992.
- MATTOS, L. M. N. *GitHub ReadPL4*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/ldemattos/readPL4>>.
- MEHDI, A. et al. A comprehensive review of auto-reclosing schemes in AC, DC, and hybrid (AC/DC) transmission lines. *IEEE Access*, v. 9, p. 74325–74342, 2021.
- MILNE, K. Single-pole reclosing tests on long 275 kV transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 82, n. 68, p. 658–661, 1963.
- Ministério de Minas e Energia. Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro - junho. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secrarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2023/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico-junho-2023.pdf/view>>.
- NGAMSANROAJ, K.; PREMRUDEEPREECHACHARN, S. An analysis of single pole reclosing on 500 kV line in Thailand. In: *2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*. Singapore: [s.n.], 2007. p. 443–448.
- NIKOOFEKR, I.; SADEH, J. Determining secondary arc extinction time for single-pole auto-reclosing based on harmonic signatures. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 163, p. 211–225, 2018.
- ONS. Relatório Técnico, *Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022.
- ONS. Relatório Técnico, *Relatório de Análises Estatísticas de Desligamentos Forçados Referente ao Ano de 2021*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/sites/2/21/paginas/servicos/produtos.aspx>>.
- ONS. Procedimentos de Rede, *Submódulo 2.3 Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>.

- ONS. Procedimentos de Rede, *Submódulo 2.6 Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>.
- ONS. Relatório Técnico, *Relatório de Análise Estatística do Desempenho de Esquemas de Religamento Automático Referente ao Ano de 2022*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/sites/2/21/paginas/servicos/produtos.aspx>>.
- PAGANOTTI, A. *Cálculo e Minimização de Campos Elétricos de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São João Del-Rei, 2012.
- PESSOA, F. P.; ACOSTA, J. S.; TAVARES, M. C. Cálculo dos parâmetros do arco elétrico em sistemas de corrente contínua utilizando teoria de identificação de sistemas. v. 2, n. 1, 2020.
- PINHEIRO, M. G.; TAVARES, M. C. Análise de sensibilidade de parâmetros elétricos de linhas de transmissão dependentes na frequência. *SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 20, p. 335–344, 2009.
- Python Documentation. *Subprocess management*. 2023. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/library/subprocess.html>>.
- SÁ, A. *Modelagem de arco elétrico no ar. Aplicações em sistemas de potência*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- SAHOO, B.; SAMANTARAY, S. Wavelet-based auto-reclosing technique for TCSC compensated lines connecting windfarm. In: IEEE. *2018 20th National Power Systems Conference (NPSC)*. Tiruchirappalli, India, 2018. p. 1–6.
- SCHAER, F.; BALTENSPERGER, P. Short-circuit tests with rapid reclosing on the 220 kV mettlen-lavorgo line [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 75, n. 3, p. 1137–1146, 1956.
- SUN, Q. et al. Influence of grading capacitor of multiple-break circuit breaker on the extinction of secondary arc—a new method for reducing dead time. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Wiley Online Library, v. 11, n. 8, p. 1954–1965, 2017.
- SUONAN, J.; SHAO, W.; SONG, G. Study on single-phase adaptive reclosure scheme based on parameter identification. In: IEEE. *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. [S.l.], 2008. p. 1797–1801.
- THOMANN, G.; LAMBERT, S.; PHALOPRAKARN, S. Nonoptimum compensation schemes for single pole reclosing on EHV double circuit transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 2, p. 651–659, 1993.
- 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*, v. 66, n. 1, p. 405–413, 1947.
- WILCOX, T.; HORE, R. Single-phase autoreclosure on the 330 kV kariba transmission system. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, v. 81, n. 3, p. 999–1006, 1962.

XIE, C. et al. Anti-interference adaptive single-phase auto-reclosing schemes based on reactive power characteristics for transmission lines with shunt reactors. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 170, p. 176–183, 2019.

APÊNDICE A – Parâmetros considerados na modelagem das estruturas utilizadas nas simulações

Dentre os principais fatores que impactam na intensidade do arco secundário, destaca-se a topologia da torre. Neste contexto, a correta caracterização e detalhamento dos dados e parâmetros elétricos e geométricos de cada silhueta são imprescindíveis para as análises e avaliações dos resultados apresentados.

A seguir, são apresentadas as silhuetas típicas adotadas para as linhas estudadas bem como a saída da sub-rotina LCC do ATP com os resultados da matriz dos parâmetros elétricos.

- Estrutura típica da linha de 230 kV

Para a modelagem da linha de 230 kV, considerou-se a estrutura típica monomastro estaiada, nomeada tipo vela, apresentada na Figura 42.

Para os cabos condutores, utilizou-se as seguintes características elétricas:

- $R_{in} = 0,0$ [cm]
- $R_{out} = 1,575$ [cm]
- $R_{dc} = 0,0562$ [Ω /km]

Em relação aos para-raios, foram adotados dois cabos predominantes em todo o trecho da linha. Um cabo EAR 3/8” e um OPGW com as seguintes características elétricas:

1. Cabo para-raios EAR 3/8”

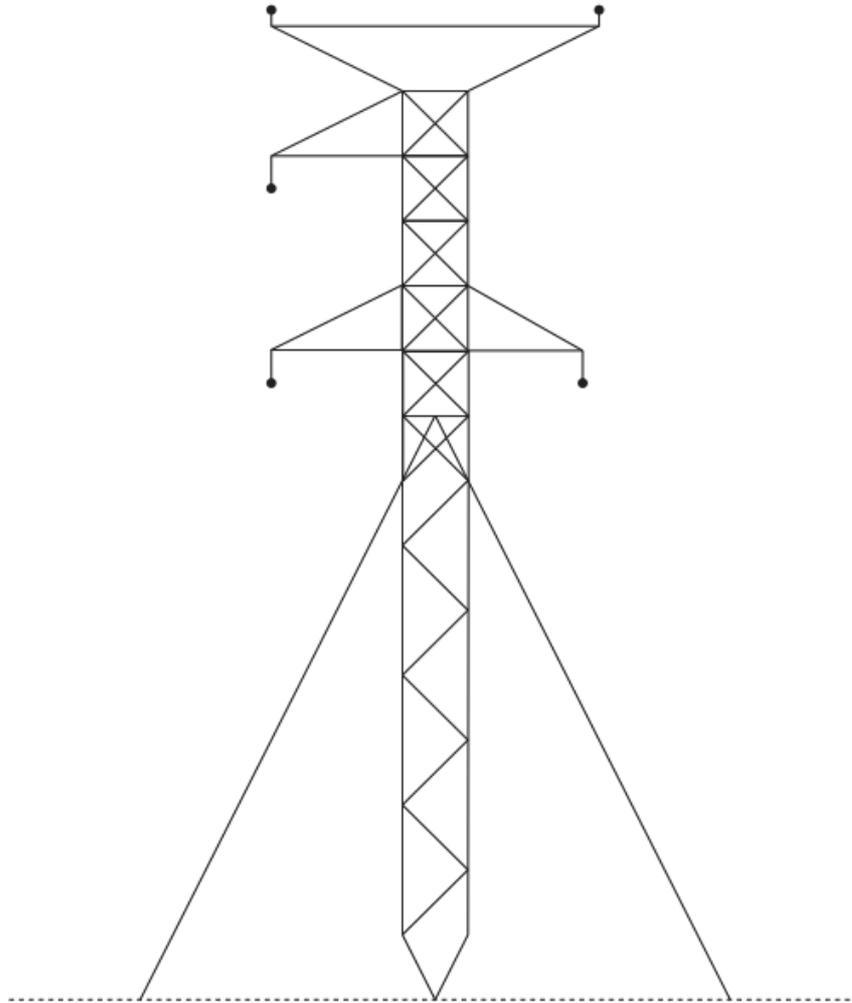
- $R_{in} = 0,0$ [cm]
- $R_{out} = 0,457$ [cm]
- $R_{dc} = 4,2322$ [Ω /km]

2. Cabo para-raios OPGW

- $R_{in} = 0,36$ [cm]
- $R_{out} = 0,670$ [cm]
- $R_{dc} = 0,803$ [Ω /km]

Os parâmetros supracitados são intrínsecos dos cabos adotados e dependem das propriedades química de seus materiais. Além desses, deve-se também especificar as

Figura 42 – Estrutura monomastro estaiada (vela).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

posições de cada cabo em relação aos demais e ao solo. Para essa linha, utilizado condutor singelo, isto é, apenas um cabo por fase basta especificar as coordenadas deste condutor, conforme apresentado na Tabela 15. Observa-se que as coordenadas foram definidas considerando o solo como a referência horizontal e uma linha traçada verticalmente no meio da torre como a referência vertical.

Tabela 15 – Coordenadas dos cabos na torre típica de 230 kV.

Fase/para-raios	Horizontal (m)	Vertical (m)	Altura meio do vão (m)
A	-3,43	25,17	7,5
B	3,43	25,17	7,5
C	3,43	30,67	13
PR1	-3,43	35,18	20,57
PR2	3,43	35,18	20,57

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O código mostrado na Figura 43 apresenta a saída do cálculo da sub-rotina LCC considerando a silhueta e parâmetros supracitados para o primeiro trecho da transposição da linha considerando seu tamanho nominal de 31,17 km.

Figura 43 – Cálculo do LCC para linha de 230 kV.

```

C <++++++> Cards punched by support routine on 11-Nov-18 11.00.00 <++++++>
C **** UNTRANPOSED K.C. Lee line calculated at 6.000E+01 HZ. ****
C LINE CONSTANTS
C $ERASE
C BRANCH IN_001OUT001IN_002OUT002IN_003OUT003
C METRIC
C 1 .5 .0562 4 3.15 -3.43 25.17 7.5 0.0 0.0
C 2 .5 .0562 4 3.15 3.43 25.17 7.5 0.0 0.0
C 3 .5 .0562 4 3.15 -3.43 30.67 13. 0.0 0.0
C 0 .5 4.2322 4 0.914 -3.43 35.18 20.57 0.0 0.0
C 0.2313 .803 4 1.34 3.43 35.18 20.57 0.0 0.0
C BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
C 1.E3 60. 31.17 1
C The transformation matrix was calculated at 6.00000000E+01 Hz.
$VINTAGE, 1
-1IN_001OUT001 4.36741E-01 8.03790E+02 2.14580E+05-3.11700E+01 1 3
-2IN_002OUT002 5.83686E-02 3.54796E+02 2.92658E+05-3.11700E+01 1 3
-3IN_003OUT003 5.90846E-02 3.86172E+02 2.92634E+05-3.11700E+01 1 3
$VINTAGE, 0
0.56692871 0.76333236 0.29050519
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.60354922 -0.14641422 -0.79819020
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.56064265 -0.62919519 0.52773018
0.00000000 0.00000000 0.00000000

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- Estrutura típica convencional da linha de 500 kV

Tabela 16 – Coordenadas dos cabos na torre típica de 500 kV.

Fase/para-raios	Horizontal (m)	Vertical (m)	Altura meio do vão (m)	Alpha (graus)	NC
A	-7,5	34,53	13,23	45,0	4
B	0,0	41,66	20,36	45,0	4
C	7,5	34,53	13,23	45,0	4
PR1	-6,3	48,08	30,38	0,0	1
PR2	6,3	48,08	30,38	0,0	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

1. Cabo para-raios Aço EHS 3/8" e 7 fios

- $R_{in} = 0,0$ [cm]
- $R_{out} = 0,467$ [cm]
- $R_{dc} = 4,17576$ [Ω /km]

2. Cabo para-raios OPGW

- $R_{in} = 0,36$ [cm]
- $R_{out} = 0,670$ [cm]
- $R_{dc} = 0,813052$ [Ω /km]

Para essa linha, utilizou-se quatro condutores por fase, formando um quadrado, conforme mostrado na Figura 44. Dessa forma, para feixes de condutores simétricos, há a possibilidade de inserir os dados das coordenadas na sub-rotina LCC do ATP de um dos condutores e os demais são calculados. Além de especificar o número de condutores (NC), basta especificar a coordenada do condutor mais abaixo e à direita e definir ângulo (Alpha) no sentido anti-horário e a distâncias (Separ) que os demais condutores estará deste, a Figura 14 exemplifica esses conceitos. Desse modo, os parâmetros necessários para a entrada do LCC desta silhueta estão apresentados na Tabela 16.

O código mostrado na Figura 45 apresenta a saída do cálculo da sub-rotina LCC considerando a silhueta e parâmetros supracitados para o primeiro trecho da transposição da linha considerando seu tamanho nominal de 25,33 km.

- Estrutura típica da LPNE 500 kV

Para a modelagem da LPNE de 500 kV, considerou-se a estrutura típica, nomeada como cross rope, apresentada na Figura 46.

Figura 45 – Cálculo do LCC para linha de 500 kV.

```

C <++++> Cards punched by support routine on 11-Nov-18 11.00.00 <++++>
C **** UNTRANSPOSED K.C. Lee line calculated at 6.000E+01 HZ. ****
C LINE CONSTANTS
C $ERASE
C BRANCH IN_001OUT001IN_002OUT002IN_003OUT003
C METRIC
C 1 .5 .066015 4 2.925 -7.5 34.53 13.23 45.7 45.
C 2 .5 .066015 4 2.925 0.0 41.66 20.36 45.7 45.
C 3 .5 .066015 4 2.925 7.5 34.53 13.23 45.7 45.
C 0 .5 4.17576 4 0.952 -6.3 48.08 30.38 0.0 0.0
C 0.2313 .813052 4 1.34 6.3 48.08 30.38 0.0 0.0
C BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
C 1.E3 60. 25.33 1
C The transformation matrix was calculated at 6.00000000E+01 Hz.
$VINTAGE, 1
-1IN_001OUT001 3.71771E-01 6.28142E+02 2.03602E+05-2.53300E+01 1 3
-2IN_002OUT002 1.71498E-02 2.54954E+02 2.95174E+05-2.53300E+01 1 3
-3IN_003OUT003 1.81113E-02 2.26360E+02 2.95404E+05-2.53300E+01 1 3
$VINTAGE, 0
0.60747510 -0.65639817 -0.46866774
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.52548149 -0.08861529 0.81930564
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.59568717 0.74919208 -0.33028596
0.00000000 0.00000000 0.00000000

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para os cabos condutores, utilizou-se feixes assimétricos com 6 condutores por fase cujas características elétricas são:

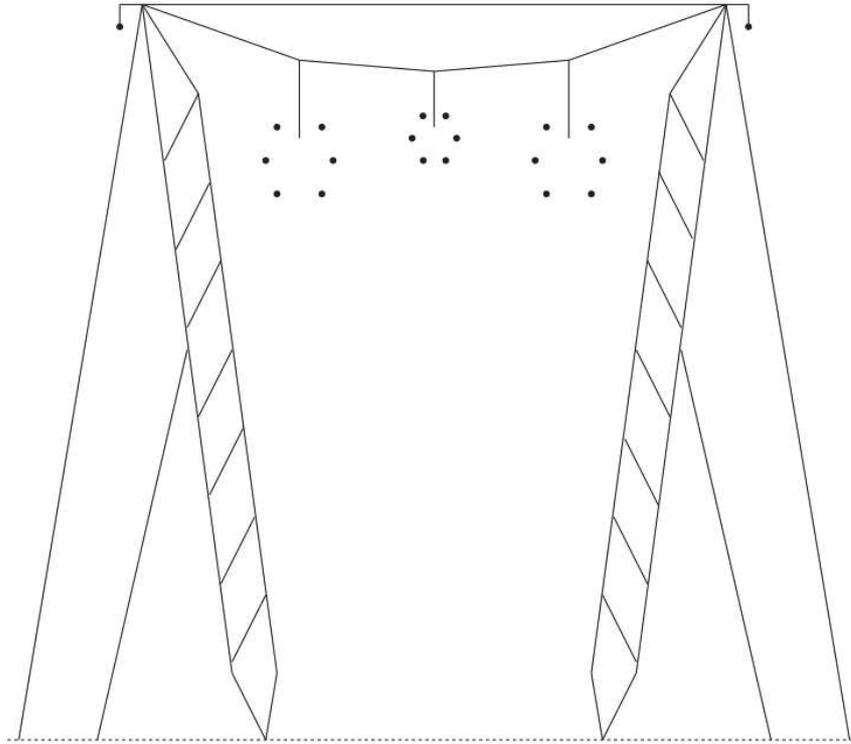
- $R_{in} = 0,18746$ [cm]
- $R_{out} = 1,339$ [cm]
- $R_{dc} = 0,07853$ [Ω /km]

Em relação aos cabos para-raios, foram adotados dois cabos para-raios predominantes em todo o trecho da linha. Um cabo EHS 3/8” e um OPGW com as seguintes características elétricas.

1. Cabo para-raios Aço EHS 3/8” e 7 fios

- $R_{in} = 0,0$ [cm]
- $R_{out} = 0,4572$ [cm]
- $R_{dc} = 4,2322$ [Ω /km]

2. Cabo para-raios OPGW

Figura 46 – Estrutura *cross rope*.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

- $R_{in} = 0,335$ [cm]
- $R_{out} = 0,670$ [cm]
- $R_{dc} = 0,724$ [Ω /km]

Conforme apresentado na Tabela 17, a silhueta de potência natural elevada é caracterizada por feixes de 6 condutores por fase assimétricos. Dessa forma, foram inseridas as coordenadas geométricas de cada condutor, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Coordenadas dos cabos na torre típica da LPNE de 500 kV

Fase/para-raios	Horizontal (m)	Vertical (m)	Altura meio do vão (m)
A1	7,55	35,56	13,79
A1	7,025	34,27	12,5
A1	5,975	34,27	12,5
A1	5,45	35,56	13,79
A1	5,975	36,85	15,08
A1	7,025	36,85	15,08
B2	0,48	35,56	13,79
B2	0,245	34,865	13,095
B2	-,245	34,865	13,095
B2	-,48	35,56	13,79
B2	-,245	36,255	14,485
B2	0,245	36,255	14,485
C3	-5,45	35,56	13,79
C3	-5,975	34,27	12,5
C3	-7,025	34,27	12,5
C3	-7,55	35,56	13,79
C3	-7,025	36,85	15,08
C3	-5,975	36,85	15,08
PR1	-15,65	45,6	26,83
PR2	15,65	45,6	26,83

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O código mostrado na Figura 47 apresenta a saída do cálculo da sub-rotina LCC considerando a silhueta e parâmetros supracitados para o primeiro trecho da transposição da linha considerando seu tamanho nominal de 56,17 km.

- Estrutura típica alternativa da LPNE de 500 kV

Como alternativa a estrutura cross rope, pode-se utilizar a estrutura autoportante (cara de gato) apresentada na Figura 48. Essa silhueta está com a mesma configuração dos feixes de condutores assimétricos da estrutura cross rope mostrada na Figura 46, as alterações são nas disposições dos feixes em relação as outras fase, aos cabo para-raios e ao solo. Além disso, ressalta-se que as características elétricas e construtivas dos cabos condutores e para-raios são as mesmas apresentadas anteriormente para a LPNE de 500 kV. As novas coordenadas geométricas dos cabos estão mostradas na Tabela 18.

Figura 47 – Cálculo do LCC para torre *cross-rope* da LPNE de 500 kV.

```

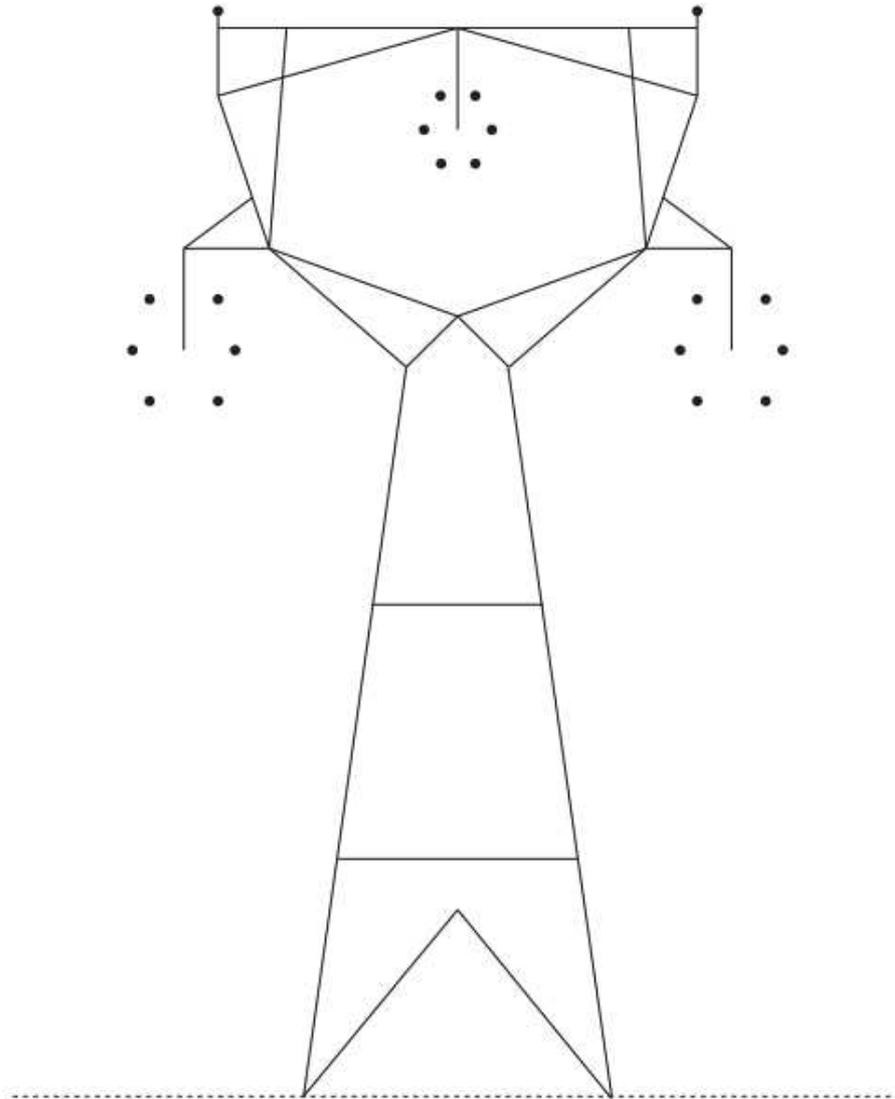
C <++++> Cards punched by support routine on 11-Nov-18 11.00.00 <++++>
C **** UNTRANSPOSED K.C. Lee line calculated at 6.000E+01 HZ. ****
C LINE CONSTANTS
C $ERASE
C BRANCH IN_001OUT001IN_002OUT002IN_003OUT003
C METRIC
C 1 .43 .07853 4 2.678 7.55 35.56 13.79
C 1 .43 .07853 4 2.678 7.025 34.27 12.5
C 1 .43 .07853 4 2.678 5.975 34.27 12.5
C 1 .43 .07853 4 2.678 5.45 35.56 13.79
C 1 .43 .07853 4 2.678 5.975 36.85 15.08
C 1 .43 .07853 4 2.678 7.025 36.85 15.08
C 2 .43 .07853 4 2.678 .48 35.56 13.79
C 2 .43 .07853 4 2.678 .245 34.865 13.095
C 2 .43 .07853 4 2.678 -.245 34.865 13.095
C 2 .43 .07853 4 2.678 -.48 35.56 13.79
C 2 .43 .07853 4 2.678 -.245 36.255 14.485
C 2 .43 .07853 4 2.678 .245 36.255 14.485
C 3 .43 .07853 4 2.678 -5.45 35.56 13.79
C 3 .43 .07853 4 2.678 -5.975 34.27 12.5
C 3 .43 .07853 4 2.678 -7.025 34.27 12.5
C 3 .43 .07853 4 2.678 -7.55 35.56 13.79
C 3 .43 .07853 4 2.678 -7.025 36.85 15.08
C 3 .43 .07853 4 2.678 -5.975 36.85 15.08
C 0 .5 4.2322 4 0.9144 -15.65 45.6 26.83
C 0 .25 .724 4 1.34 15.65 45.6 26.83
C BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
C 1.E3 60. 56.17 1
C The transformation matrix was calculated at 6.00000000E+01 Hz.
$VINTAGE, 1
-1IN_001OUT001 3.24502E-01 5.60994E+02 1.99238E+05-5.61700E+01 1 3
-2IN_002OUT002 1.42511E-02 1.65572E+02 2.94334E+05-5.61700E+01 1 3
-3IN_003OUT003 1.34694E-02 1.35619E+02 2.97058E+05-5.61700E+01 1 3
$VINTAGE, 0
0.64252677 0.71465516 -0.40751195
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.35564273 0.00436237 0.81749494
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.67873235 -0.69946334 -0.40698407
0.00000000 0.00000000 0.00000000

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O código mostrado na Figura 49 apresenta a saída do cálculo da sub-rotina LCC considerando a silhueta e parâmetros supracitados para o primeiro trecho da transposição da linha considerando seu tamanho de 3,33 km.

Figura 48 – Estrutura autoportante (cara de gato).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 18 – Coordenadas dos cabos na torre típica autoportante da LPNE de 500 kV.

Fase/para-raios	Horizontal (m)	Vertical (m)	Altura meio do vão (m)
A1	10,25	35,56	13,79
A1	9,725	34,27	12,5
A1	8,675	34,27	12,5
A1	8,15	35,56	13,79
A1	8,675	36,85	15,08
A1	9,725	36,85	15,08
B2	,48	41,56	21,79
B2	,245	40,865	21,095
B2	-,245	40,865	21,095
B2	-,48	41,56	21,79
B2	-,245	42,255	22,485
B2	,245	42,255	22,485
C3	-8,15	35,56	13,79
C3	-8,675	34,27	12,5
C3	-9,725	34,27	12,5
C3	-10,25	35,56	13,79
C3	-9,725	36,85	15,08
C3	-8,675	36,85	15,08
PR1	-8,4	48,6	29,83
PR2	8,4	48,6	29,83

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 49 – Cálculo do LCC para torre cara de gato da LPNE de 500 kV.

```

C <++++> Cards punched by support routine on 11-Nov-18 11.00.00 <++++>
C **** UNTRANPOSED K.C. Lee line calculated at 6.000E+01 HZ. ****
C LINE CONSTANTS
C $ERASE
C BRANCH IN_001OUT001IN_002OUT002IN_003OUT003
C METRIC
C 1 .43 .07853 4 2.678 10.25 35.56 13.79
C 1 .43 .07853 4 2.678 9.725 34.27 12.5
C 1 .43 .07853 4 2.678 8.675 34.27 12.5
C 1 .43 .07853 4 2.678 8.15 35.56 13.79
C 1 .43 .07853 4 2.678 8.675 36.85 15.08
C 1 .43 .07853 4 2.678 9.725 36.85 15.08
C 2 .43 .07853 4 2.678 .48 41.56 21.79
C 2 .43 .07853 4 2.678 .245 40.865 21.095
C 2 .43 .07853 4 2.678 -.245 40.865 21.095
C 2 .43 .07853 4 2.678 -.48 41.56 21.79
C 2 .43 .07853 4 2.678 -.245 42.255 22.485
C 2 .43 .07853 4 2.678 .245 42.255 22.485
C 3 .43 .07853 4 2.678 -8.15 35.56 13.79
C 3 .43 .07853 4 2.678 -8.675 34.27 12.5
C 3 .43 .07853 4 2.678 -9.725 34.27 12.5
C 3 .43 .07853 4 2.678 -10.25 35.56 13.79
C 3 .43 .07853 4 2.678 -9.725 36.85 15.08
C 3 .43 .07853 4 2.678 -8.675 36.85 15.08
C 0 .5 4.2322 4 0.9144 -8.4 48.6 29.83
C 0 .25 .724 4 1.34 8.4 48.6 29.83
C BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
C 1.E3 60. 3.33 1
C The transformation matrix was calculated at 6.00000000E+01 Hz.
$VINTAGE, 1
-1IN_001OUT001 3.42526E-01 5.15279E+02 1.93269E+05-3.33000E+00 1 3
-2IN_002OUT002 1.38442E-02 1.85427E+02 2.93053E+05-3.33000E+00 1 3
-3IN_003OUT003 1.45003E-02 1.74767E+02 2.95598E+05-3.33000E+00 1 3
$VINTAGE, 0
0.62996762 0.75870364 -0.31253414
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.41902724 -0.09899122 0.81872978
0.00000000 0.00000000 0.00000000
0.65387841 -0.64387073 -0.48166789
0.00000000 0.00000000 0.00000000

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

APÊNDICE B – Rotina de automatização do Python para alteração do reator de neutro

Neste apêndice será apresentado um exemplo da rotina implementada em Python utilizada para realizar a variação do valor dos reatores de neutro de uma linha e os impactos no RM.

A Figura 50 contém o código principal que é responsável por realizar a leitura dos parâmetros de simulação definidos no arquivo em excel e chamar as demais funções que integram o código.

Figura 50 – Código principal.

```

1 import pandas as pd
2 from C_RT import C_RT_FUN
3
4 # Leitura do excel com os parametros de simulacao para alteracao de reatores de neutro
5 df_RT_parametros = pd.read_excel('ATP_Pyhton_Excel.xlsx', sheet_name='ALTERACAO RT')
6
7 # Leitura do excel com as variaveis que serao monitoras durante a simulacao
8 df_RT_variaveis = pd.read_excel('ATP_Pyhton_Excel.xlsx', sheet_name='VARIABEIS')
9
10 # Alteracao e execucao dos novos casos
11 matr_res_freq_RT, matr_res_tempo_RT = C_RT_FUN(df_RT_parametros, df_RT_variaveis)
12
13 # Armazenamento dos resultados
14 matr_res_freq_RT.to_excel(r'resultados\res_freq_RT.xlsx')
15 matr_res_tempo_RT.to_excel(r'resultados\res_tempo_RT.xlsx')

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os códigos da Figura 51 e da Figura 52 gerenciam a alteração e execução do caso enquanto a rotina da Figura 53 interpreta os resultados obtidos em cada simulação;

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam exemplos da estrutura dos parâmetros de simulação consumidos pelo código da Figura 50.

Figura 51 – Função para construção e execução de um novo caso.

```

1 from lib_readPL4_py3 import readPL4
2 from change_reactor import alter_reator
3 from identificacao_atp import iden_atp
4 from ATP_exe import ATP_exe
5 import pandas as pd
6 import numpy as np
7 def C_RT_FUN(df, df_var):
8     # Leitura das variaveis
9     NOSI = pd.Series.to_numpy(df.loc[:, 'NOI'])
10    NOSF = pd.Series.to_numpy(df.loc[:, 'NOF'])
11    for l in range(len(NOSF)):
12        if str(NOSF[l]) == 'TERRA':
13            NOSF[l] = ' '
14    RT_ini = np.array(df.loc[:, 'Reatancia inicial'])
15    RT_fi = np.array(df.loc[:, 'Reatancia final'])
16    RRT_ini = np.array(df.loc[:, 'Resistencia inicial'])
17    RRT_fi = np.array(df.loc[:, 'Resistencia final'])
18    pont_sim = int(df.loc[0, 'Numero de sim.'])
19    RT_VAL = []
20    RRT_VAL = []
21    for h in range(len(RT_ini)):
22        RT_VAL.append(np.linspace(RT_ini[h], RT_fi[h], pont_sim))
23        RRT_VAL.append(np.linspace(RRT_ini[h], RRT_fi[h], pont_sim))
24
25    atp_freq = df.loc[0, 'Nome do .ATP']
26    atp_tempo = df.loc[1, 'Nome do .ATP']
27    tempo_abertura_arco = df.loc[0, 'Tempo Abertura Arco']
28    ind_linhas_tempo, ind_linhas_freq, matr_res_tempo, matr_res_freq,
    var_tempo_monitoradas, var_freq_monitoradas, var_ind_tempo, var_ind_freq = iden_atp(
    NOSI, NOSF, atp_freq, atp_tempo, df_var, pont_sim)
29
30    # Loop para alterar o valor do reator
31    for k in range(int(pont_sim)):
32        # Alteracao do reator de neutro para analises no tempo
33        alter_reator(atp_tempo, RT_VAL, RRT_VAL, NOSI, NOSF, ind_linhas_tempo, k)
34
35        # Executar ATP
36        ATP_exe(atp_tempo)
37        # Leitura dos resultados no tempo
38        res_tempo = readPL4(r'.\ponto_atp\\' + atp_tempo + '.pl4')
39        res_t = res_tempo[1]
40        time = res_t[:, 0]
41        arc_sec = res_t[:, 3]
42        index_open = int((tempo_abertura_arco / time[len(time) - 1]) * len(time))
43        while arc_sec[index_open] != 0:
44            index_open += 1
45
46        index_f = index_open + int(((1 / 120) / time[len(time) - 1] * len(time))
47        index_arco = index_open - int(((1 / 120) / time[len(time) - 1] * len(time))
48        matr_res_tempo.loc[k, var_tempo_monitoradas[0]] =
49        max(res_t[index_open:index_f, var_ind_tempo[0]]) / 1000 # Em kV crista
50        matr_res_tempo.loc[k, var_tempo_monitoradas[1]] = max(res_t[index_arco:index_open
51        , var_ind_tempo[1]]) / np.sqrt(2) # Em A rms
52
53        # Alteracoes na frequencia
54        alter_reator(atp_freq, RT_VAL, RRT_VAL, NOSI, NOSF, ind_linhas_freq, k)
55        # Executar ATP
56        ATP_exe(atp_freq)
57        # Leitura dos resultados na frequencia
58        res_freq = readPL4(r'.\ponto_atp\\' + atp_freq + '.pl4')
59        res_f = res_freq[1]
60        for n in range(len(var_ind_freq)):
61            matr_res_freq.loc[k, var_freq_monitoradas[n]] = max(res_f[:, n + 1]) / 1000
62        # Em kV crista
63
64    return matr_res_freq, matr_res_tempo

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 52 – Função para identificação do campo que será alterado.

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 from ATP_exe import ATP_exe
4 from lib_readPL4_py3 import readPL4
5
6 def iden_atp(NOSI, NOSF, atp_freq, atp_tempo, df_var, pont_sim):
7     # Identificacao da linhas que serao alteradas na frequencia
8     with open(r'.\ponto_atp\\' + atp_freq + '.atp', 'r') as arquivo:
9         linhas_freq = arquivo.readlines()
10        ind_linhas_freq = []
11        for n in range(len(linhas_freq)):
12            for l in range(len(NOSI)):
13                aux = linhas_freq[n]
14                if aux[0:14] == ' ' + NOSI[l] + NOSF[l] or aux[0:15] == 'C ' + NOSI[l] +
15                NOSF[l]:
16                    ind_linhas_freq.append(n)
17
18        # Identificacao da linhas que serao alteradas no tempo
19        with open(r'.\ponto_atp\\' + atp_tempo + '.atp', 'r') as arquivo:
20            linhas_tempo = arquivo.readlines()
21            ind_linhas_tempo = []
22            for n in range(len(linhas_tempo)):
23                for l in range(len(NOSI)):
24                    aux = linhas_tempo[n]
25                    if aux[0:14] == ' ' + NOSI[l] + NOSF[l] or aux[0:15] == 'C ' + NOSI[l] +
26                    NOSF[l]:
27                        ind_linhas_tempo.append(n)
28
29        # Variaveis na frequencia
30        # Executar ATP
31        ATP_exe(atp_freq)
32
33        # leitura dos resultados na frequencia
34        res_freq = readPL4(r'.\ponto_atp\\' + atp_freq + '.pl4')
35        aux = res_freq[0]
36        var_freq = aux.loc[:, 'FROM']
37        var_ind_freq = []
38        var_freq_monitoradas = pd.Series.to_list(df_var.loc[:, 'NOS MONITORADOS FROM FREQ'])
39        for k in range(len(var_freq_monitoradas)):
40            ind = np.where(var_freq == var_freq_monitoradas[k])
41            var_ind_freq.append(ind[0][0])
42
43        matriz_freq = np.zeros((pont_sim, len(var_freq_monitoradas)))
44        matr_res_freq = pd.DataFrame(matriz_freq, columns=var_freq_monitoradas)
45
46        # variaveis no tempo
47        # Executar ATP
48        ATP_exe(atp_tempo)
49
50        # Leitura dos resultados no tempo
51        res_tempo = readPL4(r'.\ponto_atp\\' + atp_tempo + '.pl4')
52        aux = res_tempo[0]
53        var_tempo = aux.loc[:, 'FROM']
54        var_ind_tempo = []
55        var_tempo_monitoradas = pd.Series.to_list(df_var.loc[:, 'NOS MONITORADOS FROM TEMPO'])
56        var_tempo_monitoradas = [x for x in var_tempo_monitoradas if str(x) != 'nan']
57
58        for k in range(len(var_tempo_monitoradas)):
59            ind = np.where(var_tempo == var_tempo_monitoradas[k])
60            var_ind_tempo.append(ind[0][0])
61
62        matriz_tempo = np.zeros((pont_sim, len(var_tempo_monitoradas)))
63        matr_res_tempo = pd.DataFrame(matriz_tempo, columns=var_tempo_monitoradas)
64
65        return ind_linhas_tempo, ind_linhas_freq, matr_res_tempo, matr_res_freq,
66        var_tempo_monitoradas, var_freq_monitoradas, var_ind_tempo, var_ind_freq

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 53 – Função para interpretação dos resultados.

```

1 def readPL4(pl4file):
2     import mmap
3     import struct
4     import pandas as pd
5     import numpy as np
6
7     miscData = {
8         'deltat': 0.0,
9         'nvar': 0,
10        'pl4size': 0,
11        'steps': 0,
12        'tmax': 0.0}
13
14    f = open(pl4file, 'rb')
15    p14 = mmap.mmap(f.fileno(), 0, access=mmap.ACCESS_READ)
16    miscData['deltat'] = struct.unpack('<f', p14[40:44])[0]
17    miscData['nvar'] = struct.unpack('<L', p14[48:52])[0] // 2
18    miscData['pl4size'] = struct.unpack('<L', p14[56:60])[0] - 1
19    miscData['steps'] = (miscData['pl4size'] - 5 * 16 - miscData['nvar'] * 16) // \
20        ((miscData['nvar'] + 1) * 4)
21    miscData['tmax'] = (miscData['steps'] - 1) * miscData['deltat']
22    dfHEAD = pd.DataFrame(columns=['TYPE', 'FROM', 'TO'])
23
24    for i in range(0, miscData['nvar']):
25        pos = 5 * 16 + i * 16
26        h = struct.unpack('3x1c6s6s', p14[pos:pos + 16])
27        dfHEAD = dfHEAD.append({'TYPE': int(h[0]), \
28                                'FROM': h[1], \
29                                'TO': h[2]}, ignore_index=True)
30
31    dfHEAD['FROM'] = dfHEAD['FROM'].str.decode('utf-8')
32    dfHEAD['TO'] = dfHEAD['TO'].str.decode('utf-8')
33
34    expsize = (5 + miscData['nvar']) * 16 + miscData['steps'] * (miscData['nvar'] + 1) *
35        4
36    nullbytes = 0
37    if miscData['pl4size'] > expsize:
38        nullbytes = miscData['pl4size'] - expsize
39
40    data = np.memmap(f, dtype=np.float32, mode='r', shape=(miscData['steps'], miscData['nvar'] + 1),
41                    offset=(5 + miscData['nvar']) * 16 + nullbytes)
42    f.close()
43    return dfHEAD, data, miscData
44
45 def convertType(df):
46     df['TYPE'] = df['TYPE'].apply(lambda x: 'V-node' if x == 4 else x)
47     df['TYPE'] = df['TYPE'].apply(lambda x: 'E-bran' if x == 7 else x)
48     df['TYPE'] = df['TYPE'].apply(lambda x: 'V-bran' if x == 8 else x)
49     df['TYPE'] = df['TYPE'].apply(lambda x: 'I-bran' if x == 9 else x)
50
51     return 0
52
53 def getVarData(dfHEAD, data, Type, From, To):
54     df = dfHEAD[(dfHEAD['TYPE'] == Type) & (dfHEAD['FROM'] == From) & (dfHEAD['TO'] == To)]
55
56     if not df.empty:
57         data_sel = data[:, df.index.values[0] + 1]
58     else:
59         print("Variable %s-%s of %s not found!" % (From, To, Type))
60         return (None)
61
62     return (data_sel)

```

Fonte: Adaptado de Mattos (2020).

Figura 54 – Exemplo de estrutura de dados da aba ALTERACAO RT no excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	NOI	NOF	Reatancia inicial	Reatancia final	Resistencia inicial	Resistencia final	Numero de sim.	Tempo Abertura Arco	Nome do .ATP
2	RN_LTA	TERRA	800	1200	0	0	100	0.67	LT_A_B_500_KV_SIL_freq
3	RN_LTB	TERRA	800	1200	0	0			LT_A_B_500_KV_SIL_time

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 55 – Exemplo de estrutura de dados da aba VARIAVEIS no excel.

	A	B
1	NOS MONITORADOS FROM TEMPO	NOS MONITORADOS FROM FREQ
2	T_LTFA	RN_LTA
3	ARC_SE	RN_LTB
4		T_LTFA
5		T_LTFB

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).