UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS URBANO PEREIRA

UTILIZAÇÃO DE REATORES DE SATURAÇÃO NATURAL PARA EXPANSÃO DA MARGEM DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Recife
2025

MATHEUS URBANO PEREIRA

UTILIZAÇÃO DE REATORES DE SATURAÇÃO NATURAL PARA EXPANSÃO DA MARGEM DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Pereira, Matheus Urbano.
Utilização de reatores de saturação natural para expansão da margem de transmissão do sistema interligado nacional / Matheus Urbano Pereira. - Recife, 2025.
79 : il., tab.

Orientador(a): Vicente Ribeiro Simoni
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Matemática - Bacharelado, 2025.
Inclui referências.

1. Margem de transmissão. 2. Reatores de saturação natural. 3. Fluxo de potência. 4. Compensadores estáticos. 5. Subestações. 6. Estudos elétricos. I. Simoni, Vicente Ribeiro. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MATHEUS URBANO PEREIRA

UTILIZAÇÃO DE REATORES DE SATURAÇÃO NATURAL PARA EXPANSÃO DA MARGEM DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 09/04/2025.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Alex Ferreira Falcão Moreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Eng. M.Sc. Ericles Mauricio Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família, meu maior apoio, e em especial à minha avó, cujos valores e caráter serviram de alicerce para meu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Apesar dos inúmeros obstáculos que se ergueram ao longo de minha graduação, muitos dos quais impactaram diferentes aspectos de minha vida, a jornada se aproxima de seu desfecho. E, neste momento, ao revisitar essa trajetória sem reconhecer que cada revés contribuiu para a minha formação como pessoa. Sei que não teria sido possível superar tantos desafios apenas com minhas próprias forças. De fato, foram inúmeras as mãos que me sustentaram, de formas diversas, e, infelizmente, não seria capaz de agradecer a cada uma individualmente. Ainda assim, há aqueles cujo apoio foi essencial, e a esses dedico reconhecimento especial.

É impensável iniciar esta lista de agradecimentos sem reverenciar Aquele que torna tudo possível. Antes de tudo, expresso minha profunda gratidão a Deus, por me conceder força e sabedoria ao longo desta caminhada e por tornar esta jornada viável, mesmo quando, em minha limitação, eu não me sentia à altura.

À minha família, agradeço pelo apoio incondicional e pelo incentivo contínuo, mesmo nos momentos mais desafiadores. Em especial à minha avó, cuja ausência é sentida, mas com um legado que permanece vivo, sendo fundamental na formação do meu caráter.

Aos meus professores que me orientaram antes de ingressar na universidade, agradeço por sempre enxergarem potencial em mim, mesmo quando eu próprio não o percebia. Em especial aos mestres Alberi e Roberval, pela dedicação incansável e pela confiança que depositaram em meu crescimento.

Dedico um agradecimento especial aos meus professores da graduação, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, em particular ao professor Vicente, que demonstrou paciência e dedicação excepcionais no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas que me acompanharam no início da minha vida profissional, agradeço imensamente pelo companheirismo, especialmente aos da Interest Engenharia, pela valiosa contribuição ao meu conhecimento sobre o setor elétrico brasileiro.

A todos que não consegui mencionar neste breve registro, deixo meu mais sincero agradecimento.

Quando já não somos capazes de mudar uma situação,
somos desafiados a mudar a nós próprios.
(Victor Frankl)

RESUMO

Atualmente, o conceito de margem de transmissão (MT) assume um papel crucial nos leilões de energia elétrica, se destacando como um elemento essencial para o planejamento e operação do sistema. Neste contexto, este trabalho aborda a investigação dos impactos na margem de transmissão resultantes da substituição de reatores lineares (RL) por reatores de saturação natural (RSN) em um trecho do Sistema Interligado Nacional (SIN). A relevância do estudo se justifica pela necessidade de aprimorar a regulação de tensão e garantir a estabilidade do sistema, especialmente em linhas de transmissão de grande extensão, onde o efeito Ferranti pode dificultar a manutenção dos níveis de tensão dentro dos limites estabelecidos pela regulamentação.

A metodologia empregada neste trabalho contempla a modelagem dos RSN para análises no *software* ANAREDE, além de sua implementação nos cálculos dos possíveis ganhos de margem. Inicialmente, os RL foram desativados, possibilitando a simulação do desempenho dos RSN em condições de elevada demanda. Em seguida, a abordagem adotada consistiu na representação dos RSN como compensadores estáticos, permitindo uma avaliação mais detalhada sob diferentes cenários operacionais. A área de estudo abrange um segmento do sistema de transmissão localizado na região Norte de Minas Gerais, compreendendo o circuito que interliga as subestações Poções III e Governador Valadares VI, escolhida em consonância com trabalhos anteriores desenvolvidos em parceria com a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf).

Ao término da pesquisa, foram ainda analisadas as curvas de estabilidade estática dos barramentos críticos do trecho estudado, visando esclarecer os impactos decorrentes da substituição dos RL pelos RSN supracitados.

Palavras-chave: Margem de transmissão; reatores de saturação natural; fluxo de potência; compensadores estáticos; subestações; estudos elétricos.

ABSTRACT

Currently, the concept of transmission margin plays a crucial role in electricity auctions, standing out as an essential element for system planning and operation. In this context, this study addresses the investigation of the impacts on transmission margin resulting from the replacement of linear reactors (LR) by natural saturation reactors (NSR) in a segment of the National Interconnected System. The relevance of this study is justified by the need to enhance voltage regulation and ensure system stability, particularly in long transmission lines, where the Ferranti effect may hinder maintaining voltage levels within regulated limits.

The methodology employed in this work encompasses the modeling of natural saturation reactors for analyses in the ANAREDE software, in addition to their implementation in calculations of potential transmission margin gains. Initially, the LR were deactivated, enabling the simulation of NSR performance under high-demand conditions. Subsequently, the adopted approach consisted of representing the NSR as static compensators, allowing for a more detailed evaluation across different operational scenarios. The study area covers a transmission system segment located in the northern region of Minas Gerais, comprising the circuit interconnecting the Poções III and Governador Valadares VI substations, selected in line with previous studies developed in partnership with the Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf).

Upon completion of the research, the static stability curves of the critical buses in the studied segment were also analyzed, aiming to clarify the impacts arising from the aforementioned replacement of LR with NSR.

Keywords: Transmission margin; natural saturation reactors; power flow; static compensator; substations; electrical studies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação do Treble-Tripler 21
Figura 2 - Curva VxI característica de um RSN.....21
Figura 3 - Modelo do RSN em regime permanente.....22
Figura 4 - Circuito entre as subestações de Teresina e Milagres.....23
Figura 5 - Subestação de Mossoró após a conexão de um RSN.....24
Figura 6 - Circuito Coxipó-Sinop, da Eletronorte.....25
Figura 7 - Gráfico comparativo entre os valores das tensões, correntes e potências reativas – barramento 230 kV na cidade Sinop.....25
Figura 8 - Comparação da demanda de potência reativa entre RSN e RL na subestação de Sinop.....25
Figura 9 - Modelo equivalente π de uma linha de transmissão.....27
Figura 10 - Modelo de transformador em fase 28
Figura 11 - Modelo do RSN em regime permanente.....29
Figura 12 - Representação dos conceitos básicos de MT.....30
Figura 13 – Componentes utilizados no sistema em estudo 33
Figura 14 - Circuito entre as subestações de Sapeaçu e Governador Valadares VI.34
Figura 15 - MT do sistema original íntegro.....36
Figura 16 - MT do sistema original após contingência limitante.....36
Figura 17 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara 38
Figura 18 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara 38
Figura 19 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara.....39
Figura 20 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu 39
Figura 21 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu 40
Figura 22 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu 40

Figura 23 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 42
Figura 24 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 42
Figura 25 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 43
Figura 26 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 43
Figura 27 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 44
Figura 28 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 44
Figura 29 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III – Ibicoara 46
Figura 30 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III – Ibicoara 46
Figura 31 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Ibicoara 47
Figura 32 - Sistema em estudo após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Sapeaçu 47
Figura 33 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Sapeaçu 48
Figura 34 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Sapeaçu 48
Figura 35 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e C2 49
Figura 36 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1, Poções III – Sapeaçu e Poções III - Ibicoara 51
Figura 37 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1, Poções III – Sapeaçu e Ibicoara - Sapeaçu 51
Figura 38 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 53

Figura 39 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 53
Figura 40 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 54
Figura 41 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 – Segunda substituição 56
Figura 42 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 – Segunda substituição 56
Figura 43 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 – Segunda substituição 57
Figura 44 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Ibicoara – Sapeaçu – Terceira substituição 59
Figura 45 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Ibicoara – Sapeaçu – Terceira substituição 59
Figura 46 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Ibicoara – Sapeaçu – Terceira substituição 60
Figura 47 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Ibicoara – Quarta substituição 60
Figura 48 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Ibicoara – Quarta substituição 61
Figura 49 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Ibicoara – Quarta substituição 61
Figura 50 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Sapeaçu – Quinta substituição 62
Figura 51 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Sapeaçu – Quinta substituição 62
Figura 52 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Sapeaçu – Quinta substituição 63
Figura 53 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C1 – Sexta substituição 65
Figura 54 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C1 – Sexta substituição 65

Figura 55 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C1 – Sexta substituição 66
Figura 56 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C2 – Sétima substituição 66
Figura 57 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C2 – Sétima substituição 67
Figura 58 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C2 – Sétima substituição 67
Figura 59 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema íntegro – Primeira a quinta substituições.....69
Figura 60 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema íntegro – Quinta a sétima substituições.....70
Figura 61 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema degradado – Primeira a quinta substituições.....71
Figura 62 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema degradado – Quinta a sétima substituições.....72
Figura 63 - Curvas de estabilidade para Ibicoara – Sistema íntegro – Primeira a quinta substituições.....73
Figura 64 - Curvas de estabilidade para Ibicoara – Sistema íntegro – Quinta a sétima substituições.....74
Figura 65 - Curvas de estabilidade para Ibicoara – Sistema degradado – Primeira a quinta substituições.....75
Figura 66 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema degradado – Quinta a sétima substituições.....76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis utilizadas nos cálculos de fluxo de potência 27
Tabela 2 – Códigos aplicados no cálculo de MT do ANAREDE.....31
Tabela 3 – Significado dos códigos utilizados no diagrama do trecho estudado.....32
Tabela 4 - Margem de transmissão do sistema original 35
Tabela 5 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara....37
Tabela 6 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu ..41
Tabela 7 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 41
Tabela 8 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 41
Tabela 9 - MT do sistema após desligamento dos RL de diferentes LT adjacentes a Poções III – Segunda iteração 45
Tabela 10 - MT do sistema após substituição dos RL de diferentes LT adjacentes a Poções III – Primeira substituição 52
Tabela 11 - MT do sistema após substituição dos RL de diferentes LT adjacentes a Poções III – Segunda substituição 55
Tabela 12 - MT do sistema após substituição dos RL de diferentes LT adjacentes a Ibicoara – Terceira substituição.....58
Tabela 13 - MT do sistema após substituição dos RL da última LT adjacente a Ibicoara – Quarta substituição.....58
Tabela 14 - MT do sistema após substituição dos RL da última LT adjacente a Poções III – Quinta substituição 58
Tabela 15 - MT do sistema após substituição dos RL das LT que conectam Padre Paraíso II a Governador Valadares VI – Sexta substituição.....64
Tabela 16 - MT do sistema após substituição dos RL da última LT que conecta Padre Paraíso II a Governador Valadares VI – Sétima substituição 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	*Alternative Transient Program*
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
EMTP	*Electromagnetic Transient Program*
LR	*Linear Reactor*
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Margem de Transmissão
NSR	*Natural Saturation Reactor*
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
PEL	Plano de Operação Elétrica
RL	Reator Linear
RSN	Reator de Saturação Natural
SIN	Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 OBJETIVOS 18
1.1.1 Geral 18
1.1.2 Específicos 18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
2.1 REATORES DE SATURAÇÃO NATURAL 20
2.2 CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA 26
2.2.1 Modelagem de Linhas de Transmissão 27
2.2.2 Modelagem de Transformadores em Fase 28
2.2.3 Modelagem de RSN 28
2.3 MARGEM DE TRANSMISSÃO NO ANAREDE 29
3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO 32
4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO 35
4.1 ABORDAGEM INICIAL: DESLIGAMENTO DOS RL 35
4.2 RSN MODELADOS COMO COMPENSADORES ESTÁTICOS 52
4.3 ANÁLISE DAS CURVAS DE ESTABILIDADE **PxV** 68
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 77
5.1 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 77
REFERÊNCIAS 78

1 INTRODUÇÃO

O nível de desenvolvimento de uma sociedade está intrinsecamente ligado ao seu consumo energético, e por consequência, com sua capacidade de geração. A fim de suprir a crescente demanda dos principais consumidores, o sistema de transmissão desempenha um papel essencial, tornando fundamental assegurar a supervisão adequada das linhas de transmissão para garantir a continuidade e a eficiência no fornecimento de energia [1].

Nesse cenário, o conceito de margem de transmissão (MT) representa a máxima injeção de potência admissível pelo sistema sem violar critérios de segurança operacional e, concomitantemente, evitando a necessidade de ampliações e reforços na rede [2].

No que tange as linhas de transmissão (LT), a manutenção é imprescindível devido à constante exposição destes elementos a diferentes eventos, tais como descargas atmosféricas e curtos-circuitos. Dentre os fenômenos indesejáveis que podem vir a incidir sobre esses elementos, destaca-se o efeito Ferranti, caracterizado pela elevação da tensão no terminal receptor. Tal fenômeno é mais acentuado em linhas de maior extensão, comuns em países de grandes dimensões, como o Brasil, e em períodos de carga leve [3].

Para reduzir o efeito Ferranti e aprimorar a regulação de tensão, são frequentemente empregados bancos de reatores lineares (RL) em derivação conectados aos terminais das LT. Esses dispositivos atuam na compensação da admitância *shunt* das linhas de transmissão, atenuando a elevação de tensão resultante [4].

Apesar de bancos de RL em derivação proporcionarem uma regulação de tensão eficaz e econômica, a aplicação destes equipamentos possui como ônus sua contínua conexão aos terminais das linhas energizadas, atuando como cargas permanentes, podendo limitar o fluxo de potência. Em períodos de carga leve, essa característica é benéfica, pois impede a elevação da tensão. Contudo, em horários de pico, em carga pesada, a demanda imposta pelos RL pode reduzir a tensão abaixo dos níveis exigidos pelos órgãos responsáveis, como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [5].

Uma alternativa econômica e mais sofisticada é o uso de **reatores de saturação natural** (RSN), dispositivos que funcionam de forma semelhante aos RL em períodos de carga leve, absorvendo altas correntes em resposta à elevação de tensão. No entanto, durante picos de demanda, quando as tensões de barramento tendem a ser mais baixas, os RSN absorvem pouquíssima potência reativa, se comportando como se estivessem desconectados do terminal da LT [6]. Com base no exposto anteriormente, é conveniente analisar o ganho de margem de transmissão possível em decorrência da aplicação de RSN para compensação de potência reativa do sistema, em substituição aos atuais RL.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Analisar os possíveis ganhos na margem de transmissão de potência decorrentes do uso de RSN conectados em derivação nos terminais de LT, substituindo os RL instalados previamente.

1.1.2 Específicos

O presente estudo tem como objetivo específico analisar os ganhos de margem de transmissão proporcionados pela substituição de RL por RSN. Para tal, a pesquisa foi conduzida em um trecho do sistema de transmissão localizado na Região Norte de Minas Gerais, considerando suas particularidades.

Os objetivos específicos incluem:

- Realizar o cálculo de margem de transmissão utilizando o programa computacional ANAREDE;
- Avaliar os benefícios técnicos resultantes da integração de RSN na região estudada;
- Comparar o desempenho da margem de transmissão antes e após a substituição dos RL.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado de acordo com a seguinte distribuição de capítulos:

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, estruturada em três seções principais: RSN, modelagem dos componentes do sistema elétrico e margem de transmissão. A primeira seção abrange uma síntese dos materiais consultados para a elaboração deste estudo, com foco específico nos benefícios do uso de RSN em sistemas de transmissão. A segunda seção consiste numa breve revisão da modelagem dos principais componentes do Sistema Interligado Nacional (SIN). Por fim, a terceira seção explora o conceito de margem de transmissão, fundamental para o setor elétrico brasileiro, e apresenta alguns detalhes de sua aplicação no programa ANAREDE.

O Capítulo 3 consiste na descrição do caso base utilizado para pesquisa deste trabalho, contextualizando as premissas adotadas durante o desenvolvimento desta análise.

O Capítulo 4 é dedicado ao desenvolvimento do trabalho, detalhando as estratégias adotadas para modelagem dos RSN, bem como os desafios enfrentados ao longo desta pesquisa e as estratégias adotadas para sua superação.

Por último, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões da pesquisa, acompanhadas de sugestões para possíveis investigações futuras que desejem aprofundar ou expandir os temas abordados neste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capitulo é sintetizar as informações obtidas durante a etapa de revisão da literatura, as quais serviram para embasar a pesquisa desenvolvida no presente trabalho.

2.1 Reatores de Saturação Natural

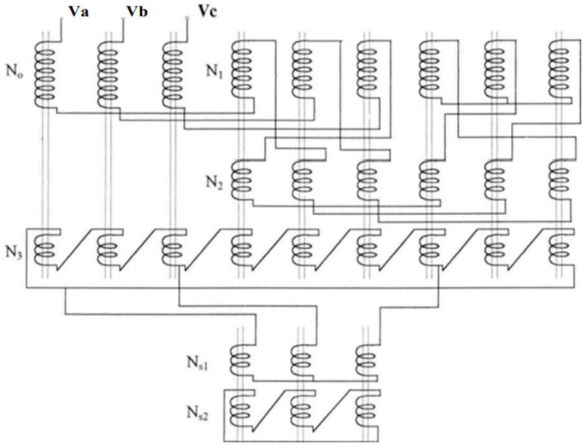
A regulação de tensão é um tópico de crucial importância nos sistemas elétricos de potência, em especial naqueles que possuem em sua composição linhas de transmissão longas, como o SIN. Em virtude desta necessidade, existem diferentes alternativas com o objetivo de compensar reativos nos terminais das linhas de transmissão, sendo que algumas destas podem não ser economicamente atraentes apesar da eficiência apresentada.

Dentre estas alternativas, se destacam no quesito economicidade os bancos de RL conectados em derivação, os quais apresentam satisfatória regulação de tensão em períodos de carga leve, porém em carga pesada, proporcionam acentuada queda de tensão, podendo violar os limites operacionais do sistema. Visando evitar tais inconformidades, é possível limitar o fluxo de potência em determinadas LT nos períodos de carga pesada. Outra possível solução para esse problema seria a adoção de RSN, os quais são igualmente robustos e econômicos, com a vantagem de demandar baixíssima potência reativa nos momentos em que a tensão em seus terminais se encontre abaixo dos valores de início de saturação, o que permite a modelagem desses equipamentos como RL desligados nesses intervalos, enquanto atuam de forma similar aos RL para os períodos de carga leve no barramento [7].

Em virtude da limitada utilização de RSN, cuja aplicação geralmente se restringe à composição de compensadores estáticos para supressão de flutuações de tensão em ambientes industriais [8], esses dispositivos careciam de modelos para simulação que considerassem adequadamente suas características não lineares. Tal necessidade foi suprida e houve o desenvolvimento de um modelo no *Electromagnetic Transient Program – Alternative Transient Program* (EMTP-ATP), com base na topologia de reatores *Treble-Tripler*, os quais dispõem de nove núcleos, além da

possibilidade de um reator auxiliar para controle da característica VxI, o qual colabora na eliminação de componentes harmônicas [9]. Na Figura 1 pode ser conferido o esquema da topologia de reatores supracitada.

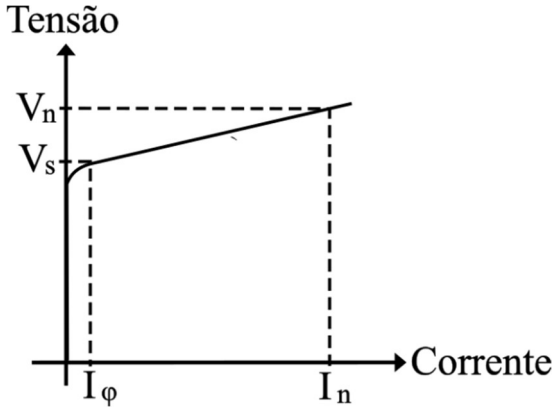
Figura 1 - Representação do Treble-Tripler



Fonte: adaptado de [9]

A vantagem dos RSN frente aos RL consiste em sua curva característica de funcionamento, vide Figura 2. Para pontos de operação localizados entre o ponto de início de saturação (V_s, I_ϕ) e o ponto de operação nominal (V_n, I_n), o equipamento apresenta razoável absorção de potência reativa do sistema, de modo semelhante a um reator tradicional. Para tensões inferiores a V_s, o que é esperado em momentos de alta carga, a absorção de potência reativa deste componente é irrisória [6].

Figura 2 - Curva VxI característica de um RSN



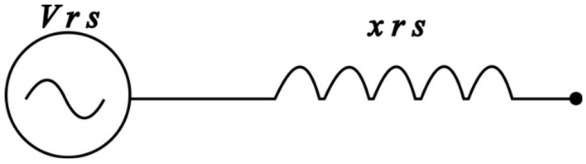
Fonte: adaptado de [6]

Considerando as análises em regime permanente, é possível representar um RSN por meio de uma fonte senoidal de tensão conectada em série com uma reatância, conforme pode ser verificado na Figura 3 [10]. Convém enfatizar que o modelo proposto é ajustado para estudos em frequência fundamental, negligenciando as perdas totais deste equipamento, que representam menos de 0,6% de sua capacidade nominal [7]. Tal abordagem permite a simplificação da modelagem, adequando-a às análises de fluxo de carga.

A aplicação desses modelos é exemplificada por simulações realizadas em sistemas reais, como o eixo de transmissão de $500\ kV$ do Nordeste brasileiro, no qual foi verificado o aumento da máxima transferência de potência e da margem de estabilidade de tensão em pelo menos 17% e 29% respectivamente, no caso de inclinação de 10% da curva característica [7]. Também foi possível observar vantagens técnicas semelhantes na aplicação do RSN em um sistema radial convencional de $230\ kV$ [10].

A simplificação mencionada destaca que o RSN, ao operar sem controle externo complexo, melhora a estabilidade de tensão e a flexibilidade operacional, especialmente em sistemas de transmissão longos com variação significativa de carga. A escolha do modelo proposto reflete tanto a adequação teórica às condições de regime permanente quanto os benefícios práticos da aplicação destes equipamentos.

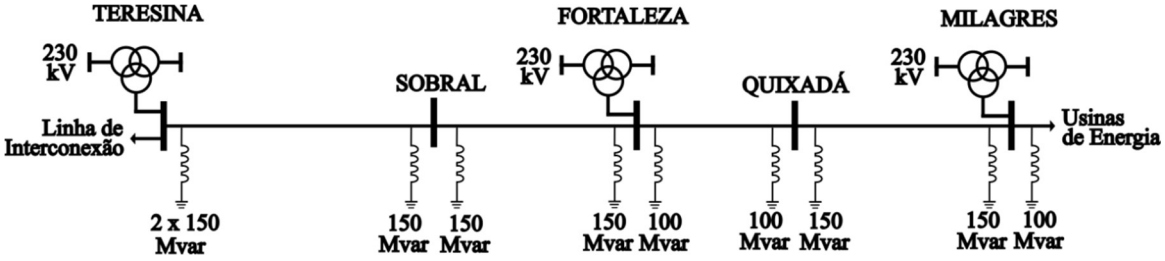
Figura 3 - Modelo do RSN em regime permanente



Fonte: adaptado de [10]

Também é possível a verificação de ganhos no fluxo de potência e na operação do circuito que conecta as subestações de Teresina e Milagres, em função da aplicação dos RSN ao invés dos RL, representados na Figura 4.

Figura 4 - Circuito entre as subestações de Teresina e Milagres



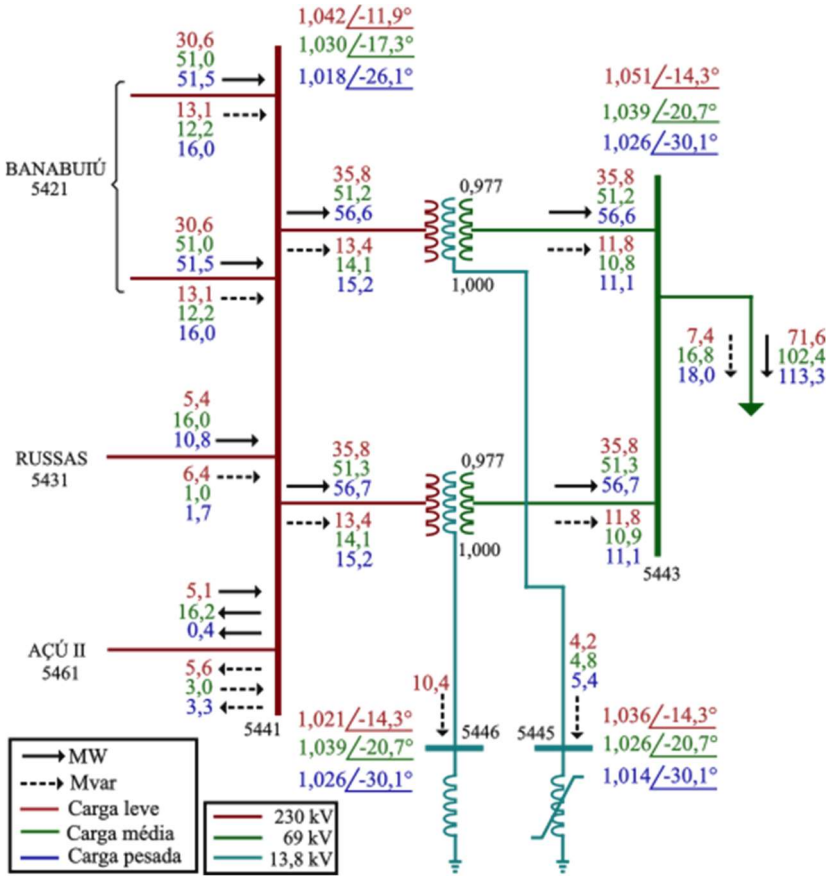
Fonte: adaptado de [6]

A substituição dos RL por RSN demonstrou ser vantajosa, uma vez que esses dispositivos permitem um controle mais suave da tensão, em função de sua operação no trecho saturado de sua curva característica. Outro aspecto relevante diz respeito à qualidade da energia, particularmente no que se refere à geração de harmônicos. Embora tradicionalmente se atribua aos RSN a produção de distorções harmônicas em razão de seu comportamento não linear, os estudos demonstram que a configuração *Treble-Tripler* atende adequadamente aos limites estabelecidos em norma, garantindo que os níveis de distorções harmônicas nos barramentos do sistema permaneçam dentro dos valores regulamentares [6].

Além das vantagens mencionadas acima, é possível verificar que a aplicação dos RSN resulta em um incremento na capacidade da linha de transmissão, bem como na melhor atenuação de sobretensões transitórias durante o religamento monofásico, tornando a operação do sistema mais segura e confiável [11].

De modo semelhante, também foram verificados ganhos expressivos decorrentes da introdução do RSN como substituto do RL no barramento de $13{,}8\ kV$ da subestação de Mossoró, dentre os quais convém destacar a suspensão das operações diárias, bem como a redução nas intervenções nos comutadores dos transformadores de potência [12]. Um diagrama unifilar da subestação após a substituição pode ser conferido na Figura 5. É importante ressaltar que o RSN está conectado ao barramento identificado pelo código 5445.

Figura 5 - Subestação de Mossoró após a conexão de um RSN

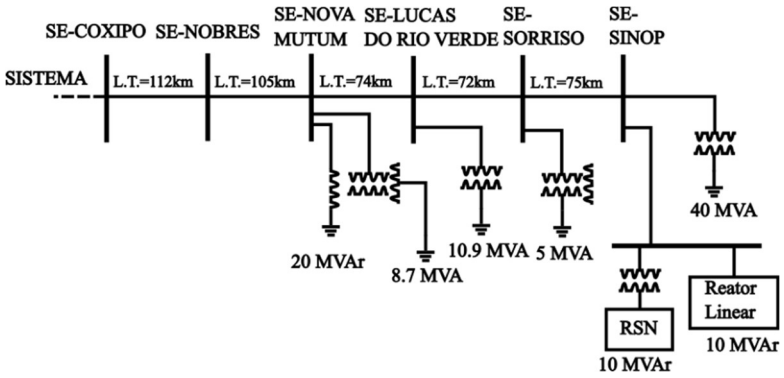


Fonte: adaptado de [12]

No que tange aos aspectos construtivos e de projeto deste RSN, foi demonstrado que seu comportamento harmônico é adequado às normas vigentes e seus custos de produção seriam semelhantes aos de um transformador trifásico de mesma potência, além das perdas elétricas que não seriam superiores a $1{,}0\ \%$ [13].

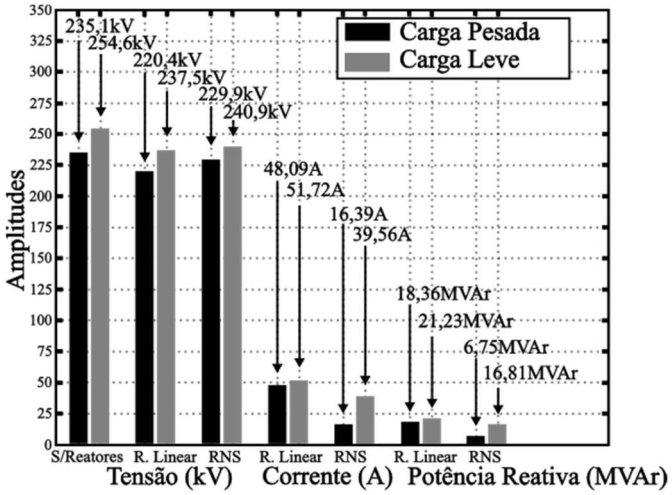
A aplicação de RSN na subestação de Sinop, pertencente à Eletronorte, resultou em ganhos significativos na regulação de tensão e na elevação da potência natural do sistema em relação aos reatores convencionais [14]. Os RSN se mostraram particularmente eficientes diante da súbita redução de carga no barramento de $230\ \mathrm{kV}$, mitigando a elevação abrupta de tensão e atendendo aos limites operacionais [15]. Além disso, a demanda de potência reativa dos RSN foi menor tanto em carga pesada quanto após o alívio de carga, em conformidade com os estudos anteriores. A rede estudada pode ser conferida na Figura 6, e o ganho decorrente da substituição dos RL pode ser verificado na Figura 7 e na Figura 8.

Figura 6 - Circuito Coxipó-Sinop, da Eletronorte



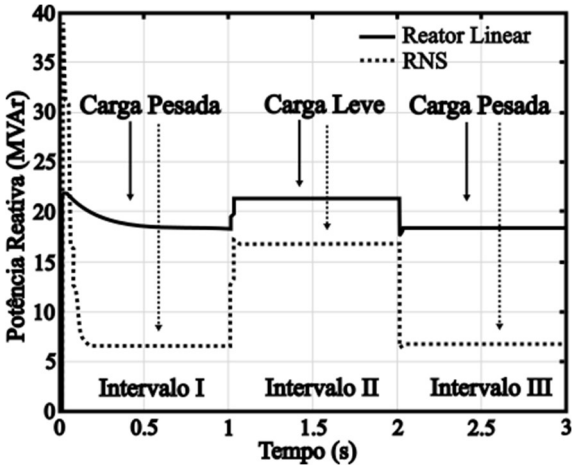
Fonte: adaptado de [14]

Figura 7 - Gráfico comparativo entre os valores das tensões, correntes e potências reativas – barramento 230 kV na cidade Sinop



Fonte: adaptado de [15]

Figura 8 - Comparação da demanda de potência reativa entre RSN e RL na subestação de Sinop



Fonte: adaptado de [15]

2.2 Cálculo de fluxo de potência

Os estudos de fluxo de potência desempenham papel fundamental no planejamento de sistemas elétricos, pois permitem a observação do comportamento dos valores de tensão, corrente e potência ativa da rede em regime permanente. Essa análise é viabilizada pelo cálculo de fluxo de potência, que consiste na obtenção da solução de um sistema de equações e inequações originado das leis de Kirchhoff. Esse sistema considera quatro variáveis associadas a cada barra, sendo duas previamente determinadas e duas incógnitas. As possíveis variáveis são V_k e θ_k, referentes ao módulo e ao ângulo de fase da tensão respectivamente, e P_k e Q_k, correspondentes à potência ativa e reativa injetadas na barra [16].

Com base nas variáveis fornecidas no problema, as barras são classificadas em três categorias [16]:

- PQ: são fornecidos P_k e Q_k, sendo V_k e θ_k calculados;
- PV ou barra de tensão controlada: são fornecidos P_k e V_k, sendo Q_k e θ_k calculados;
- Referência: são fornecidos V_k e θ_k, sendo P_k e Q_k calculados.

As equações supracitadas correspondem ao balanço de potência para cada barra, isto é, o somatório de potência ativa e reativa injetadas em cada barra deve ser igual ao total de potência fornecido pela barra ao sistema. Tal aplicação consiste na primeira lei de Kirchhoff e pode ser sintetizada pelas seguintes expressões matemáticas [16]:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \tag{2.1}$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_k(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \tag{2.2}$$

O significado de cada variável utilizada pode ser conferido na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas nos cálculos de fluxo de potência

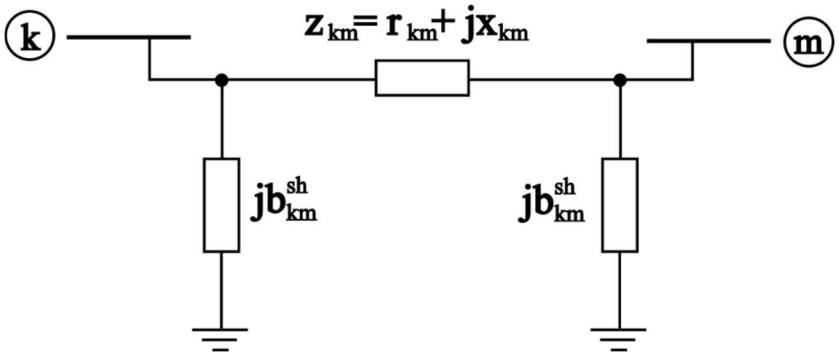
k	Variável auxiliar localizada no intervalo $[1, NB]$, sendo NB o número de barras da rede.
Ω_k	Conjunto das barras adjacentes à barra k.
V_k, V_m	Magnitude das tensões das barras terminais do ramo $k-m$.
θ_k, θ_m	Ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k-m$.
P_{km}	Fluxo de potência ativa no ramo $k-m$.
Q_{km}	Fluxo de potência reativa no ramo $k-m$.
Q_k^{sh}	Injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra k.

Fonte: adaptado de [16]

2.2.1 Modelagem de Linhas de Transmissão

Para os fins de cálculo de fluxo de potência, pode ser utilizado o modelo π das linhas de transmissão, o qual requer como parâmetros a impedância série z_{km} do componente, constituída pela resistência série r_{km} e pela reatância série x_{km}, bem como sua susceptância *shunt* b_{km}^{sh}, conforme pode ser verificado na Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Modelo equivalente π de uma linha de transmissão

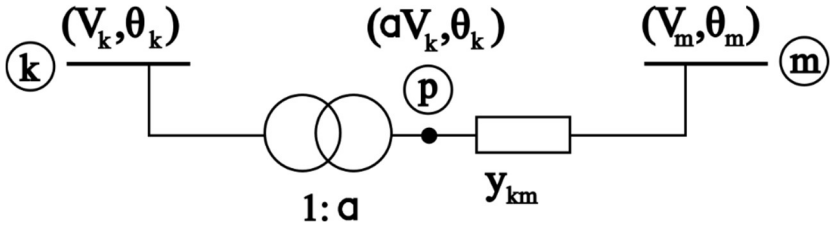


Fonte: adaptado de [16].

2.2.2 Modelagem de Transformadores em Fase

No que tange os transformadores em fase, o modelo utilizado requer como parâmetros sua série y_{km} e o valor de seu *tap a*, conforme pode ser conferido na Figura 10.

Figura 10 - Modelo de transformador em fase



Fonte: adaptado de [16].

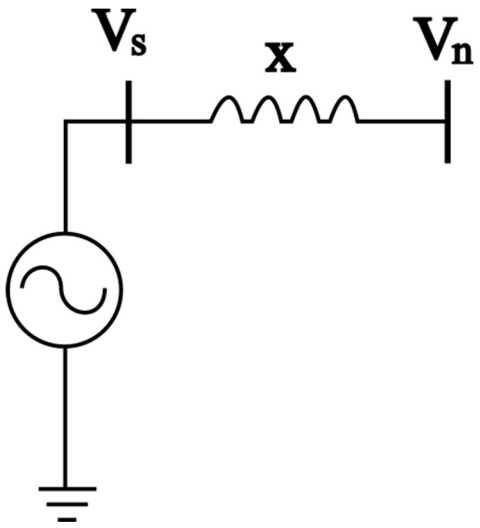
2.2.3 Modelagem de RSN

Dado que o estudo do fluxo de potência requer apenas a análise da rede em regime permanente, algumas abstrações devem ser assumidas visando simplificar a modelagem dos RSN. Tais suposições consistem em aproximar a curva característica deste componente por segmentos de reta e desprezar as suas perdas, pois são insignificantes [7]. Conforme pode ser verificado na Figura 11, a implementação deste modelo requer a inserção de duas barras, uma interna do tipo PV e outra externa do tipo PQ. No que se refere à parametrização destas barras, apenas a tensão da barra interna deve ser especificada em V_S, sendo que os demais parâmetros não terão valores calculados. A reatância x pode ser calculada por [7]:

$$x = \frac{V_n(V_n - V_s)}{Q_n} \tag{2.3}$$

Sendo $\mathrm{Q_n}$ a potência nominal do RSN.

Figura 11 - Modelo do RSN em regime permanente



Fonte: adaptado de [7]

Outra possível estratégia para representação dos RSN em análises de fluxo de potência seria por meio da adoção de modelos de compensadores estáticos, visto que tais equipamentos possuem comportamentos análogos. Entretanto, tal abordagem exige que a banda capacitiva da curva característica do compensador seja nula, do contrário o mesmo exerceria função semelhante a bancos de capacitores, o que contradiz a proposta do equipamento [17].

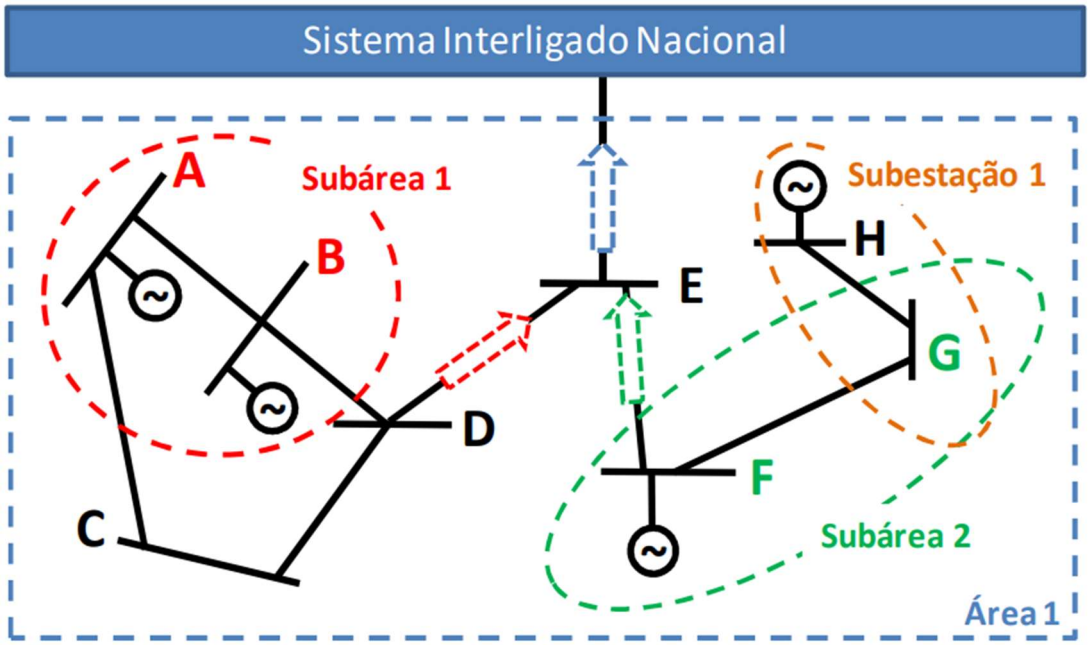
2.3 Margem de Transmissão no ANAREDE

O conceito de MT é definido como a máxima injeção de potência ativa possível de ser aplicada em um ponto do sistema elétrico sem que haja variações das margens de segurança ou a necessidade de ampliações do SIN, sendo este conceito utilizado nos Leilões de Energia organizados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) [2]. Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o módulo de cálculo de Margem de Transmissão do programa ANAREDE, desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (Cepel).

Antes de apresentar os detalhes técnicos da execução da rotina de cálculo de MT, é importante destacar alguns conceitos fundamentais à execução da rotina. É chamado de barramento candidato o ponto de injeção de potência do sistema a ser considerado na análise. A noção de subárea e de área são análogas, sendo a primeira

equivalente a um conjunto de barramentos candidatos observados no estudo, enquanto a segunda consiste num conjunto de subáreas. Uma representação que visa exemplificar estes conceitos pode ser visualizada na Figura 12 [2].

Figura 12 - Representação dos conceitos básicos de MT



Fonte: [2].

A execução da rotina de cálculo de MT do ANAREDE requer algumas informações, que podem vir a ser obrigatórias. Os códigos vinculados a estes dados de entrada podem ser conferidos na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Códigos aplicados no cálculo de MT do ANAREDE

Código	Descrição	Observação
DEMT	Responsável pela entrada de dados fundamentais ao cálculo de MT, como por exemplo o barramento candidato.	Código obrigatório para a execução da rotina.
DGMT	Responsável pela entrada de dados de eventuais pontos de conexão de geração aos barramentos candidatos analisados.	Código opcional para a execução da rotina.
DCTG	Responsável pela entrada dos dados das contingências consideradas na análise.	Código opcional para a execução da rotina.
DMTE	Responsável pela entrada dos dados referentes ao monitoramento de tensão dos barramentos selecionados.	Código opcional para a execução da rotina.
DMFL	Responsável pela entrada dos dados referentes ao monitoramento de fluxo de potência das linhas de transmissão selecionadas.	Código opcional para a execução da rotina.
EXMT	Efetivamente inicia a execução da rotina, bem como estabelece o passo padrão e o passo mínimo de incremento da potência injetada nos barramentos candidatos.	Código obrigatório para a execução da rotina.

Fonte: adaptado de [18].

Adicionalmente, convém destacar que na ausência dos códigos *DMTE* e *DMFL*, o monitoramento será restrito ao nível de tensão dos barramentos candidatos, bem como ao fluxo de potência das LT que se conectam a eles, durante a execução da rotina.

Além disso, visando obter a apropriada execução do cálculo de MT, é realizada uma etapa de pré-processamento, na qual é verificado se o caso base se adequa a algumas premissas, dentre as quais convém destacar:

I. O caso base deve ser convergente;

II. O caso base não deve violar os limites de tensão nos barramentos monitorados, conforme *DMTE*, e de fluxo de potência das LT, conforme *DMFL*;

III. As contingências listadas não devem causar problemas de convergência ou de violação dos limites de tensão dos barramentos ou de fluxo de potência das LT.

3 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

O caso de referência do ONS adotado para a elaboração deste trabalho consistiu no Plano de Ampliações e Reforços e no Plano de Operação Elétrica (PAR/PEL) Inverno 2027 Médio. Neste cenário, o trecho do SIN selecionado para análise foi o circuito que interliga as subestações de Sapeaçu, Ibicoara e Poções III, situadas na Bahia, e Padre Paraíso II e Governador Valadares VI, localizadas em Minas Gerais, vide Figura 14. A relação entre os códigos utilizados na identificação dos barramentos presentes no diagrama e seu significado pode ser conferida na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Significado dos códigos utilizados no diagrama do trecho estudado

Código	Descrição
SAPEAC-BA500	Barramento de 500 kV da subestação de Sapeaçu
IBICOA-BA500	Barramento de 500 kV da subestação de Ibicoara
POCIII-BA500	Barramento de 500 kV da subestação de Poções III
PPARA2-MG500	Barramento de 500 kV da subestação de Padre Paraíso II
GVALA6-MG500	Barramento de 500 kV da subestação de Governador Valadares VI

Fonte: O autor (2025).

Para a análise de fluxo de potência foi utilizada a versão 11.5.4 do programa computacional ANAREDE [18], desenvolvido pelo Cepel, disponibilizado sob licença estudantil. Convém destacar que por conta das limitações existentes na licença acadêmica fornecida, referentes à quantidade de barramentos e de circuitos permitidos para análise, foi necessário o uso de ferramentas de desenvolvimento de equivalentes do sistema elétrico [19], viabilizando o cálculo de margem de transmissão no SIN. Com base nessa consideração, duas premissas foram assumidas visando melhor representar o comportamento real do fluxo de potência do SIN:

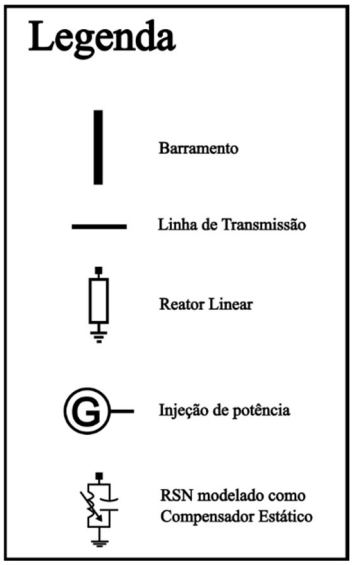
- O algoritmo de desenvolvimento de circuito equivalente foi aplicado no barramento de $500\ kV$ da subestação de Sapeaçu;
- Foi selecionado o barramento de $500\ \mathrm{kV}$ da subestação Governador Valadares VI como barra de referência do sistema, de forma a representar com maior fidelidade, em relação à rede completa, o sentido de escoamento de injeção no barramento de $500\ \mathrm{kV}$ de Sapeaçu.

Estas hipóteses permitiram uma melhor aproximação do comportamento real do sistema, no qual, de modo geral, a potência flui da Bahia para o norte de Minas Gerais. Para maior clareza, a legenda dos diagramas representados neste trabalho pode ser conferida na Figura 13, que detalha os componentes utilizados no sistema em estudo.

No que se refere aos cálculos de MT, detalhados posteriormente, foi selecionado o barramento de $500\ \mathrm{kV}$ da subestação de Sapeaçu como candidato devido a estudos prévios que estavam sendo desenvolvidos em parceria com a Chesf.

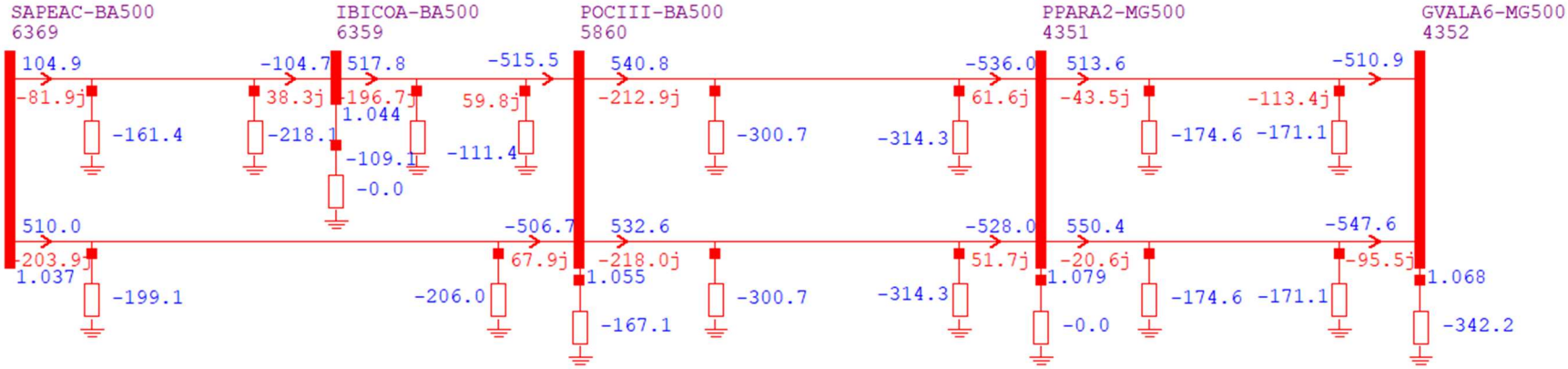
Adicionalmente, cabe salientar que foram considerados os níveis de tensão admissíveis para $500\ \mathrm{kV}$ estabelecidos pelo ONS, isto é, valores entre $1{,}0$ e $1{,}10\ pu$, para sistemas em condição operativa normal, e entre $0{,}95$ a $1{,}10\ pu$ em cenários de contingência [5].

Figura 13 – Componentes utilizados no sistema em estudo



Fonte: O autor (2025).

Figura 14 - Circuito entre as subestações de Sapeaçu e Governador Valadares VI



Fonte: O autor (2025).

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este capítulo visa descrever o progresso alcançado ao longo do trabalho, apresentando uma síntese das estratégias utilizadas e os desafios enfrentados em suas respectivas aplicações, bem como as soluções adotadas para contornar tais obstáculos.

4.1 Abordagem Inicial: Desligamento dos RL

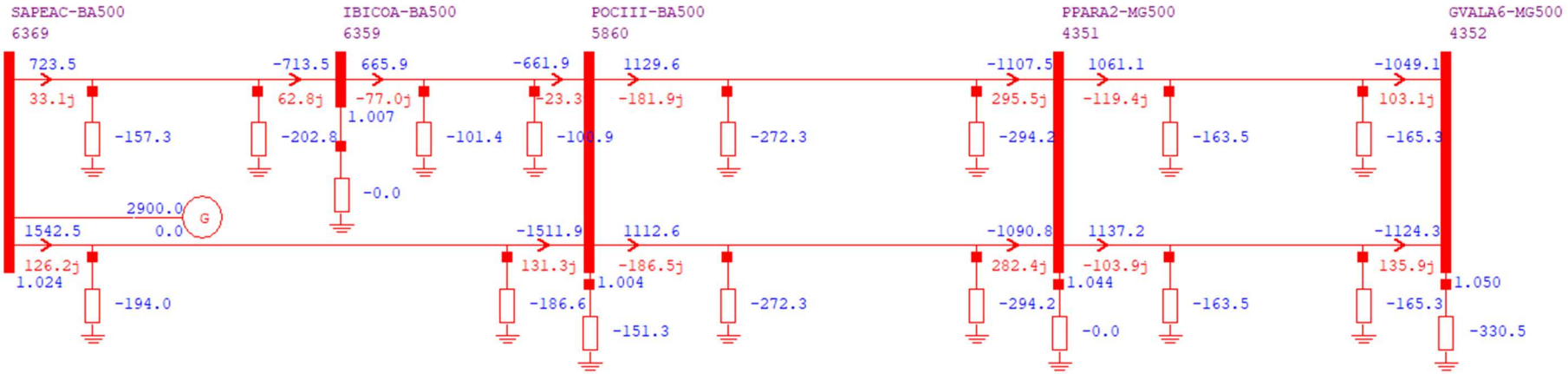
Inicialmente, foi realizado o cálculo de MT do sistema original com base nas premissas descritas no capítulo anterior. Como pode ser verificado na Tabela 4, a MT do sistema degradado por contingência limitante foi inferior à do sistema íntegro. É importante enfatizar que estes valores de MT dizem respeito às máximas injeções de potência ativa no sistema estudado que não causam violação dos limites operacionais mínimos de tensão do barramento de Poções III (1,0 pu para sistema íntegro e $0{,}95\ pu$ para sistemas com contingência). Os diagramas do cálculo de MT para os estados íntegro e degradado do sistema original podem ser conferidos na Figura 15 e na Figura 16, respectivamente. Cabe salientar que as hachuras azuis destacam os barramentos que apresentam subtensão, enquanto as vermelhas indicam sobretensão.

Tabela 4 - Margem de transmissão do sistema original

MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
2900	2800	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C1

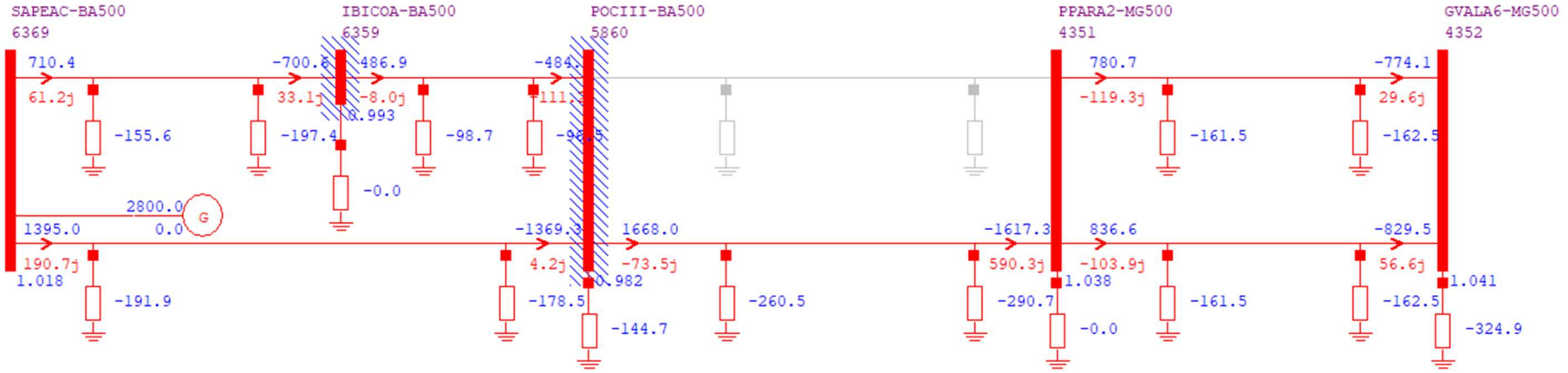
Fonte: O autor (2025).

Figura 15 - MT do sistema original íntegro



Fonte: O autor (2025).

Figura 16 - MT do sistema original após contingência limitante



Fonte: O autor (2025).

Dado que o ANAREDE ainda não dispõe de um modelo exclusivo para o RSN, o comportamento destes equipamentos foi inicialmente simulado por meio do desligamento dos RL nos terminais das LT selecionadas, uma vez que tais componentes apresentam baixíssima demanda de potência frente a valores de tensão que sejam inferiores à tensão de saturação, conforme destacado no item 2.1**.** Considerando que o equipamento responsável pelo fator limitante no cálculo de MT do sistema original foi o barramento de $500\,kV$ de Poções III, o passo seguinte consistiu em selecionar cada um dos circuitos conectados no barramento supracitado e, após desligar seus RL, realizar novamente o cálculo de margem. Neste cenário, o primeiro circuito selecionado foi a LT Poções III – Ibicoara, conforme pode ser conferido na Figura 17. Os resultados do cálculo de MT podem ser conferidos na Figura 18 e na Figura 19 para os cenários de sistema em operação íntegra e com contingência limitante, respectivamente, além de estarem resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara

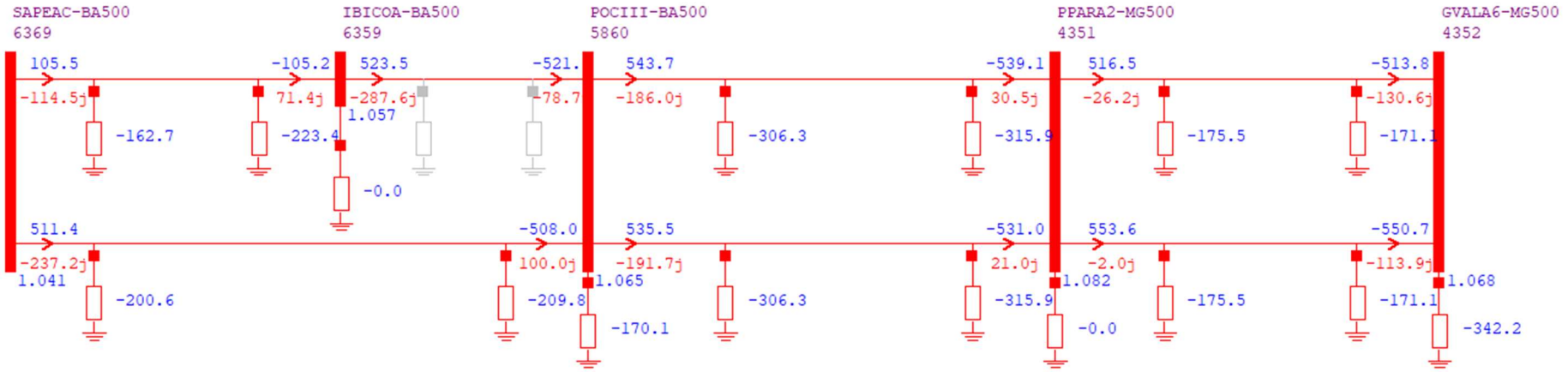
MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
3100	3025	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C1

Fonte: O autor (2025).

O processo se repetiu de modo análogo a este, mas considerando as LT Poções III – Sapeaçu, Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III – Padre Paraíso II C2. No que se refere à primeira, o diagrama unifilar do desligamento de seus RL, bem como o resultado da cálculo de MT para as situações de operação íntegra e com contingência limitante, podem ser conferidos da Figura 20 até a Figura 22 respectivamente. Tais resultados estão sintetizados na Tabela 6.

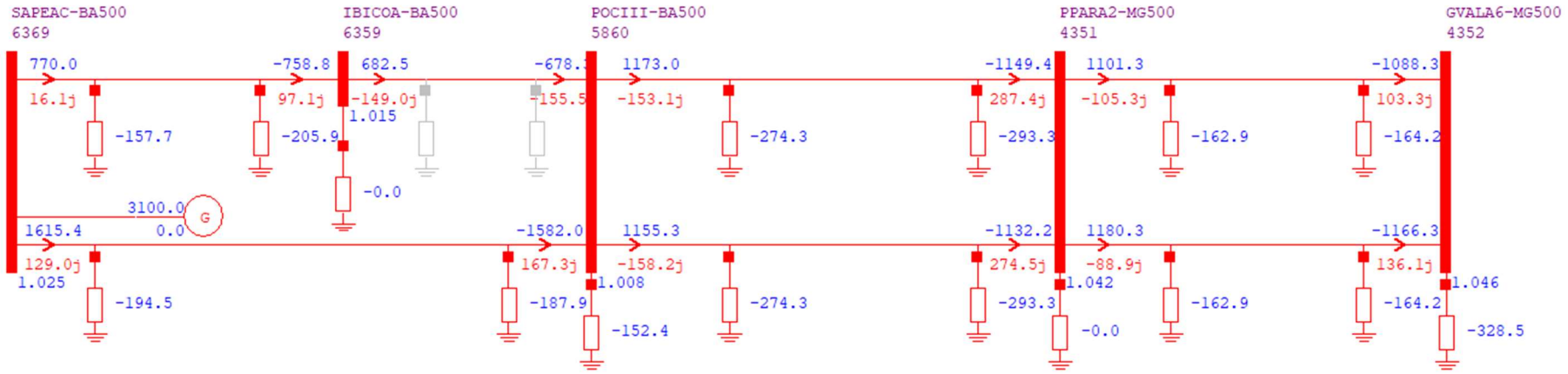
.

Figura 17 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara



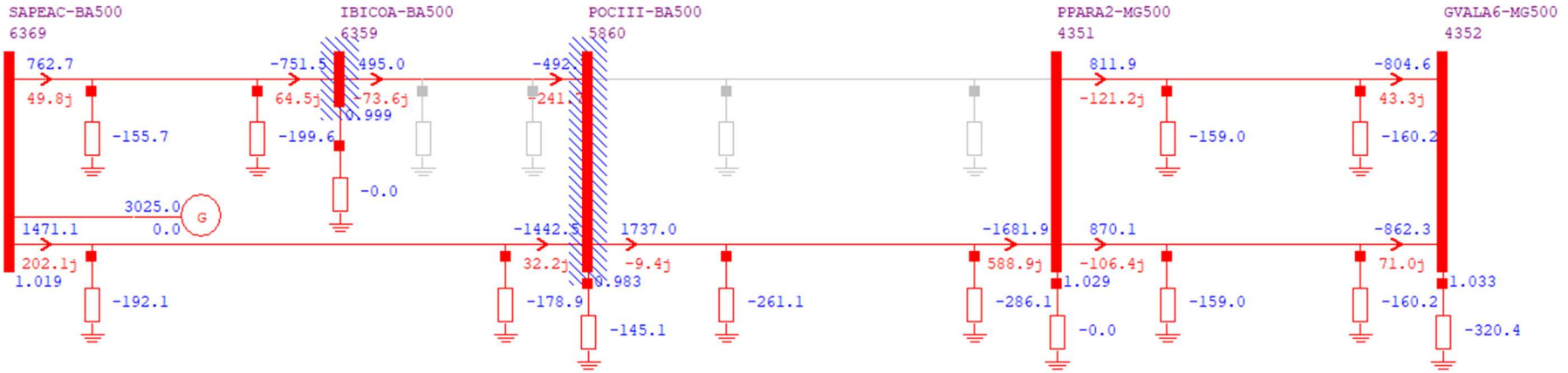
Fonte: O autor (2025).

Figura 18 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara



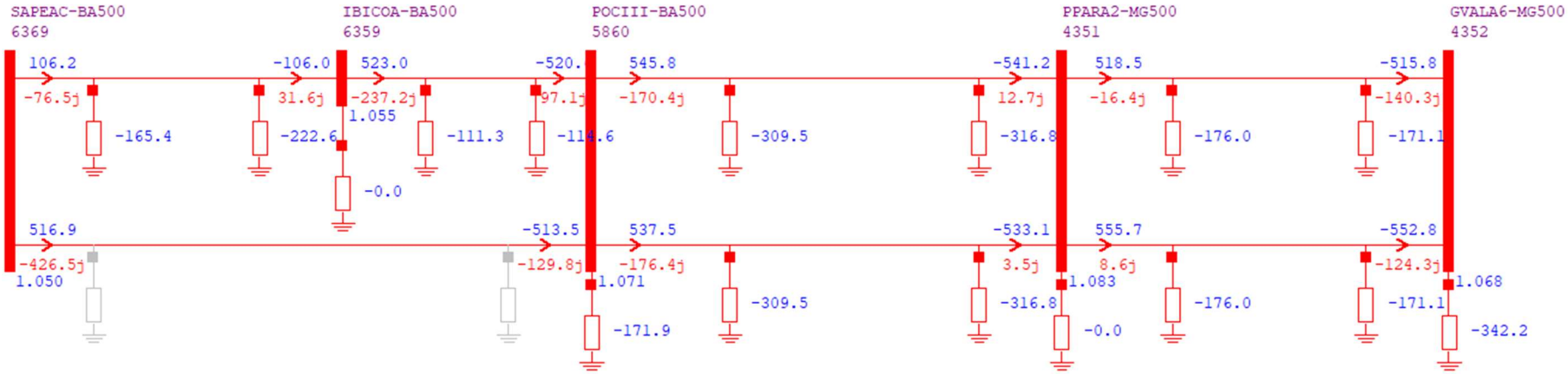
Fonte: O autor (2025).

Figura 19 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III - Ibicoara



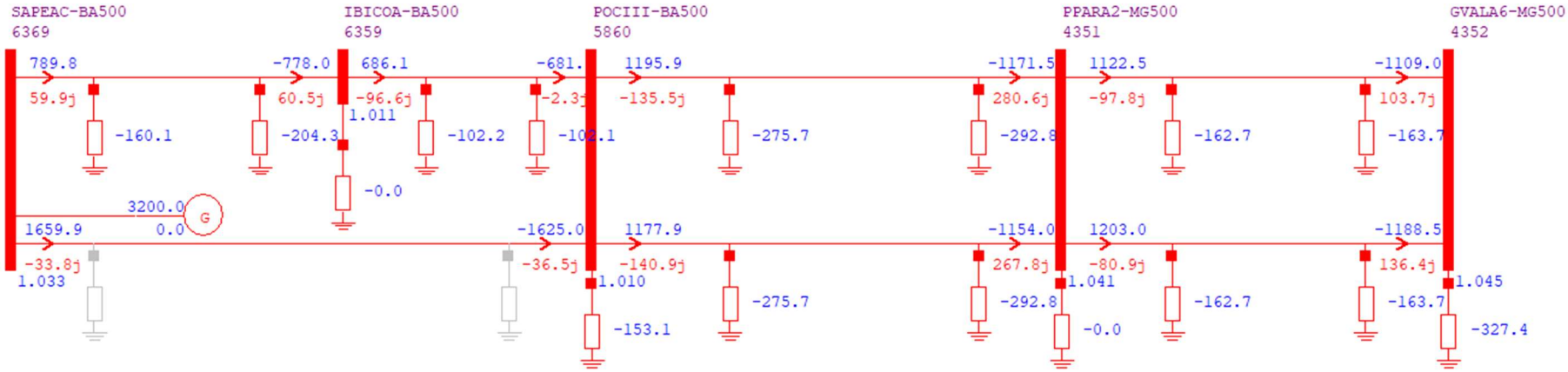
Fonte: O autor (2025).

Figura 20 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu



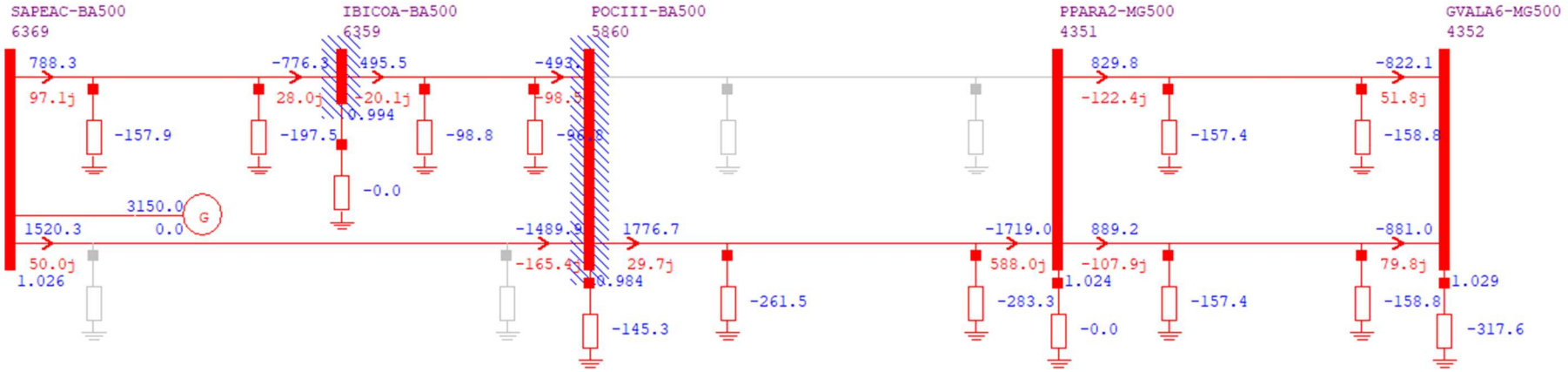
Fonte: O autor (2025).

Figura 21 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu



Fonte: O autor (2025).

Figura 22 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu



Fonte: O autor (2025).

Tabela 6 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III - Sapeaçu

MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
3200	3150	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C1

Fonte: O autor (2025).

De modo semelhante, os resultados dos demais desligamentos de RL estão disponíveis da Figura 23 até a Figura 25 para a LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e da Figura 26 até a Figura 28 para a LT Poções III – Padre Paraíso II C2. Os dados resultantes desta análise podem ser conferidos na Tabela 7 e na Tabela 8 respectivamente.

Tabela 7 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1

MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
3400	3325	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C2

Fonte: O autor (2025).

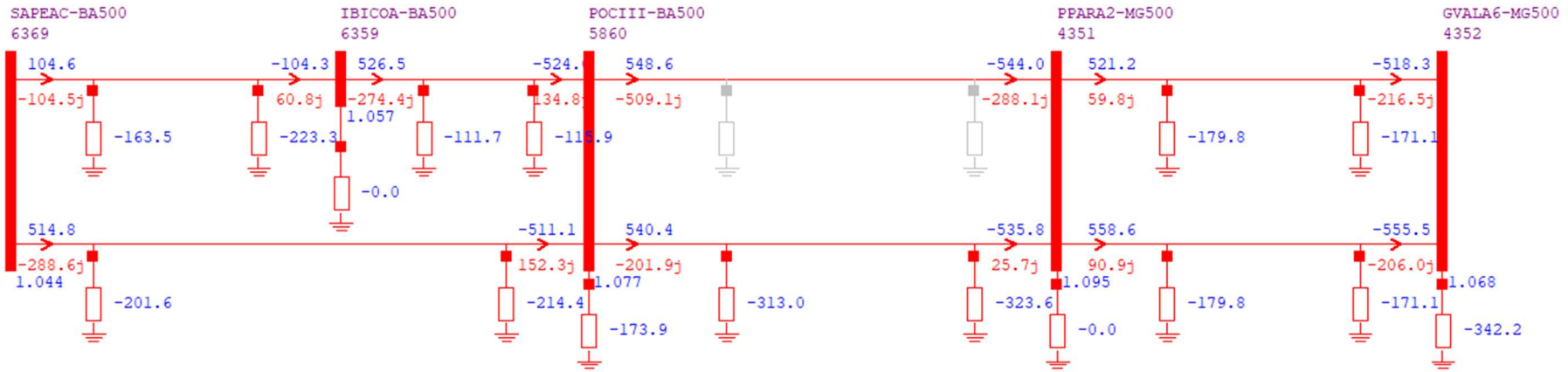
Tabela 8 - MT do sistema após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2

MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
3400	3325	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C2

Fonte: O autor (2025).

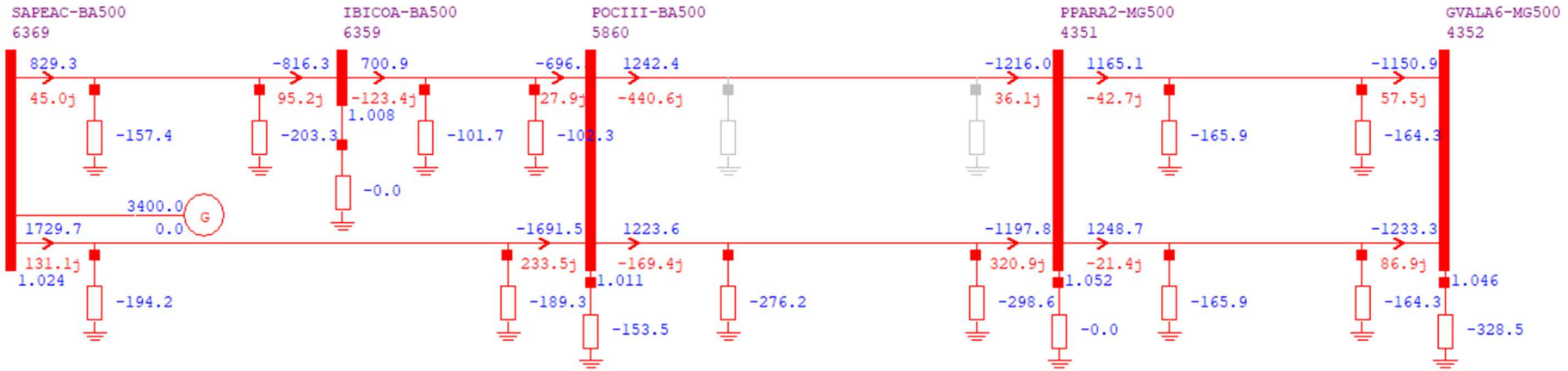
.

Figura 23 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1



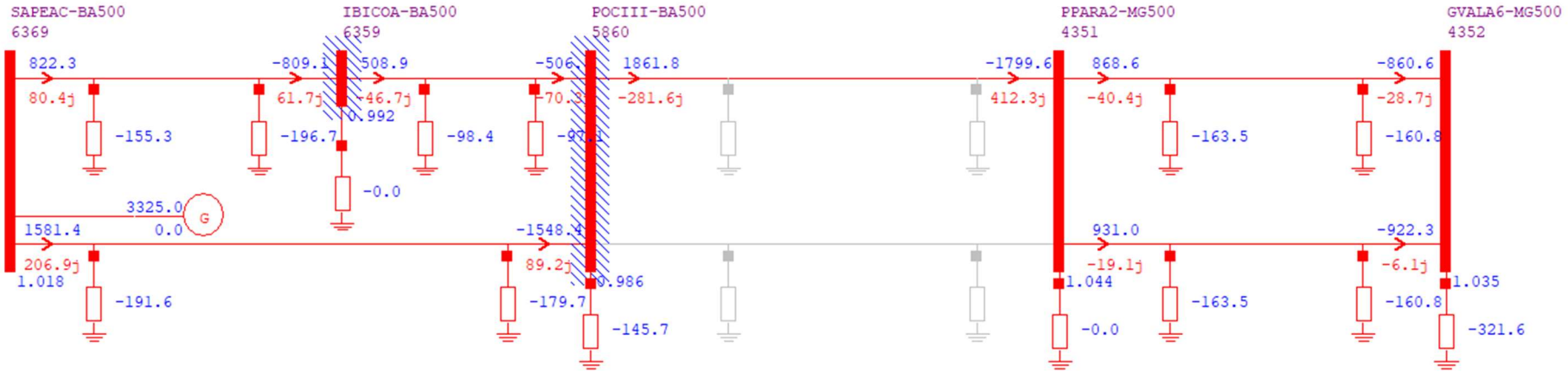
Fonte: O autor (2025).

Figura 24 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1



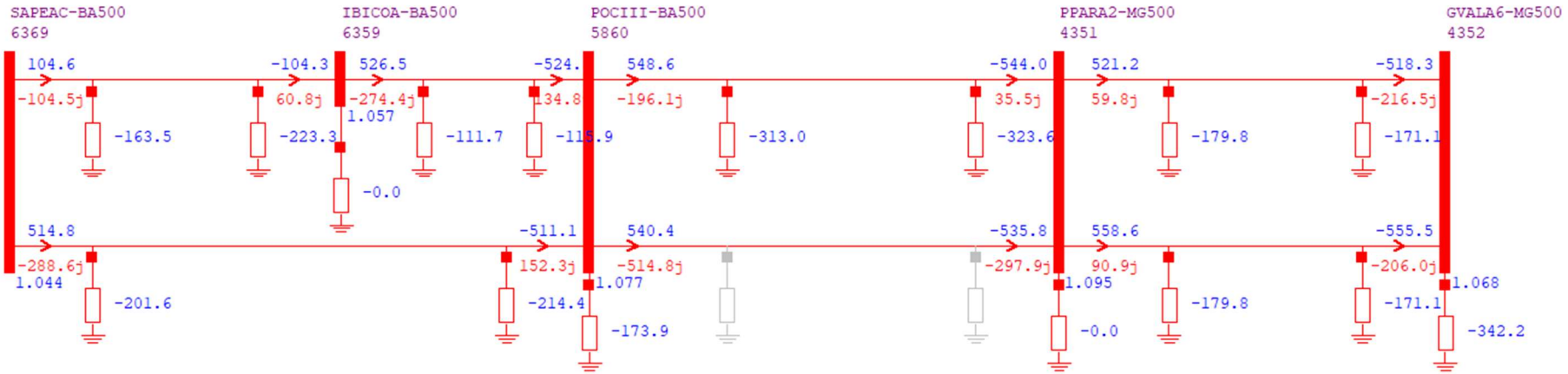
Fonte: O autor (2025).

Figura 25 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1



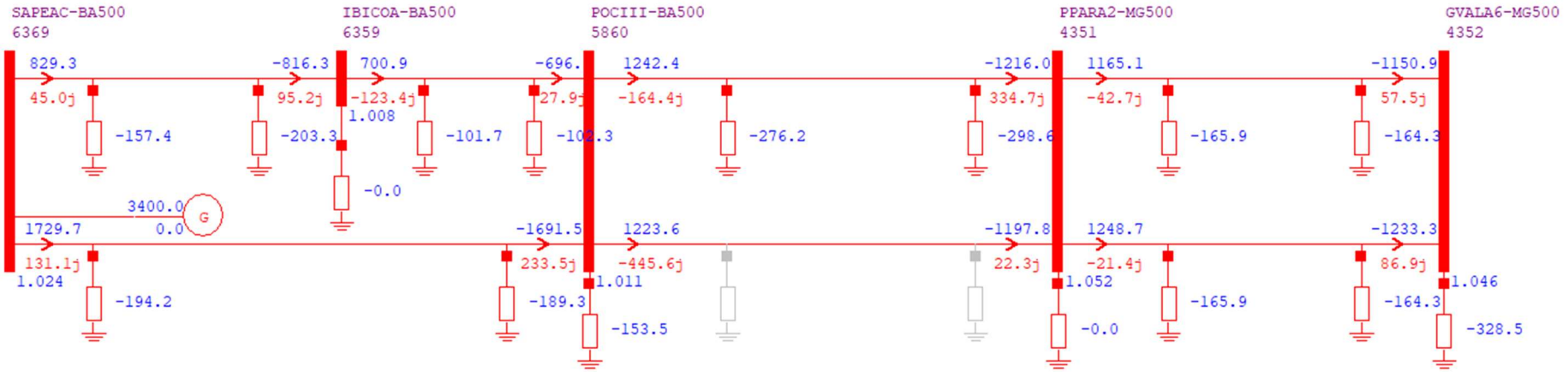
Fonte: O autor (2025).

Figura 26 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2



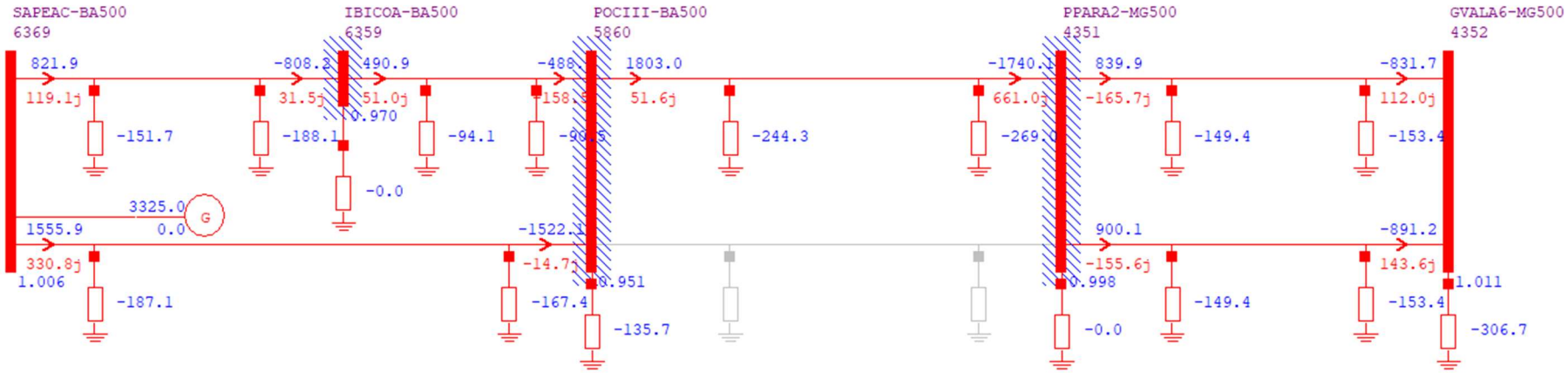
Fonte: O autor (2025).

Figura 27 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2



Fonte: O autor (2025).

Figura 28 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2



Fonte: O autor (2025).

Considerando que o desligamento dos RL nos terminais de ambas as LT que conectam as subestações de Poções III e Padre Paraíso II resultam nos mesmos ganhos de MT, foi selecionado como alvo da primeira substituição, sem perda de generalidade, o primeiro dos circuitos citados acima.

O processo se repetiu, agora partindo do cenário mencionado previamente, no qual ocorreu a substituição dos RL do primeiro circuito que interliga Poções III e Padre Paraíso II. Considerando que o fator limitante permanece sendo a tensão no barramento de Poções III, outra de suas LT adjacentes deverá ser selecionada visando a substituição de seus RL.

O resultado do desligamento dos RL dos demais circuitos adjacentes à subestação de Poções III está disponível na Tabela 9. Os diagramas do sistema em condição de operação normal, bem como com injeção de potência nos cenários íntegro e degradado por contingência limitante, para cada uma das LT, estão disponíveis da Figura 29 até a Figura 34. Convém destacar que a MT para a substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 não pôde ser calculada devido a violação dos limites de tensão no caso base, vide Figura 35, impossibilitando a execução da rotina, como destacado no item 2.3. Tal situação revela uma limitação desta abordagem aplicada ao ANAREDE e que será superada adiante.

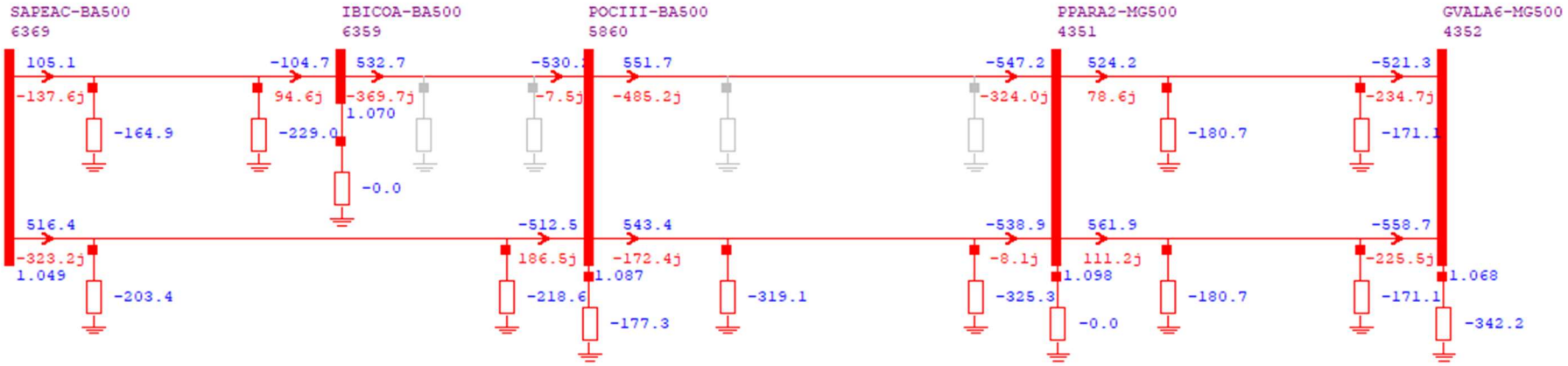
Conforme pode ser observado abaixo, o maior ganho de MT foi obtido quando do desligamento dos RL da LT Poções III – Sapeaçu. Dado que, neste cenário, o fator limitante passou a ser a tensão no barramento de Ibicoara, o processo irá se repetir, tendo como alvo os seus circuitos adjacentes.

Tabela 9 - MT do sistema após desligamento dos RL de diferentes LT adjacentes a Poções III – Segunda iteração

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
Poções III - Ibicoara	3600	3525	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C2
Poções III - Sapeaçu	3700	3625	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu

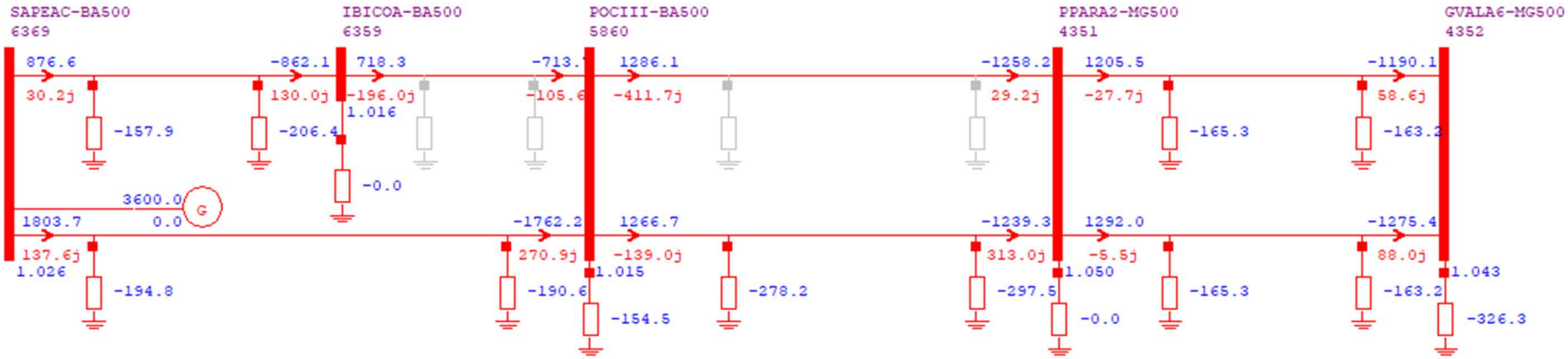
Fonte: O autor (2025).

Figura 29 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III – Ibicoara



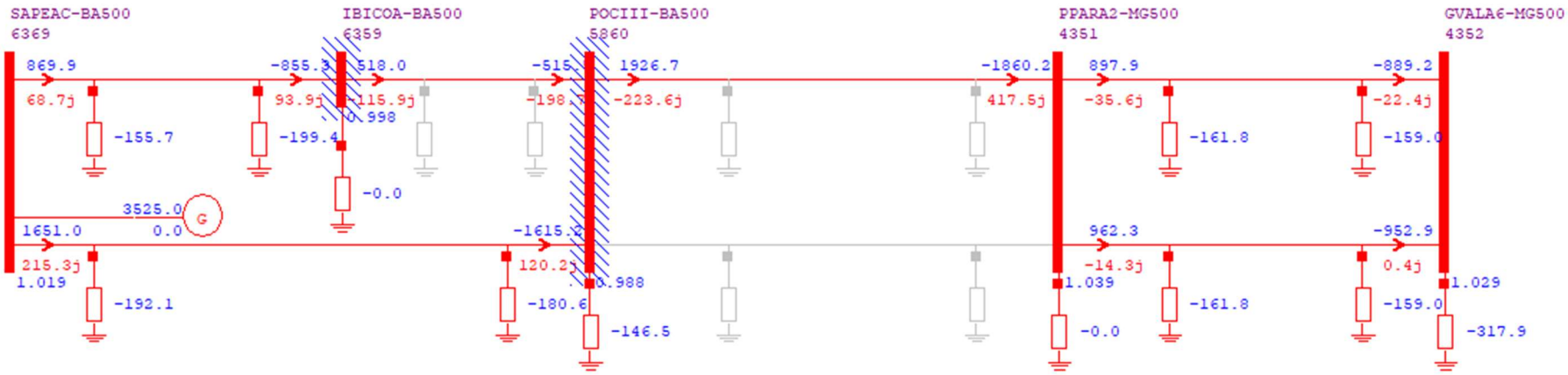
Fonte: O autor (2025), adaptado de [6]

Figura 30 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III – Ibicoara



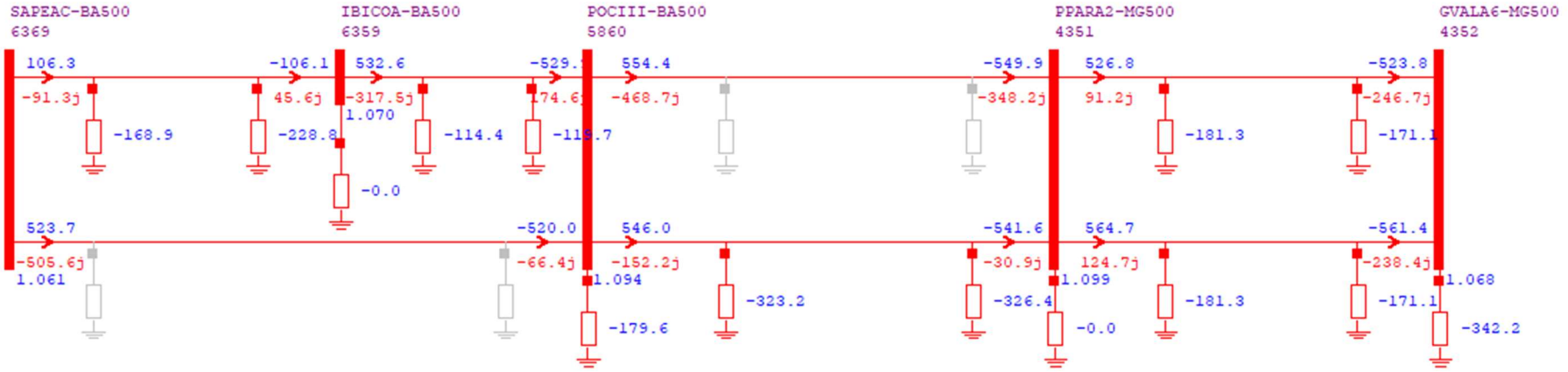
Fonte: O autor (2025).

Figura 31 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Ibicoara



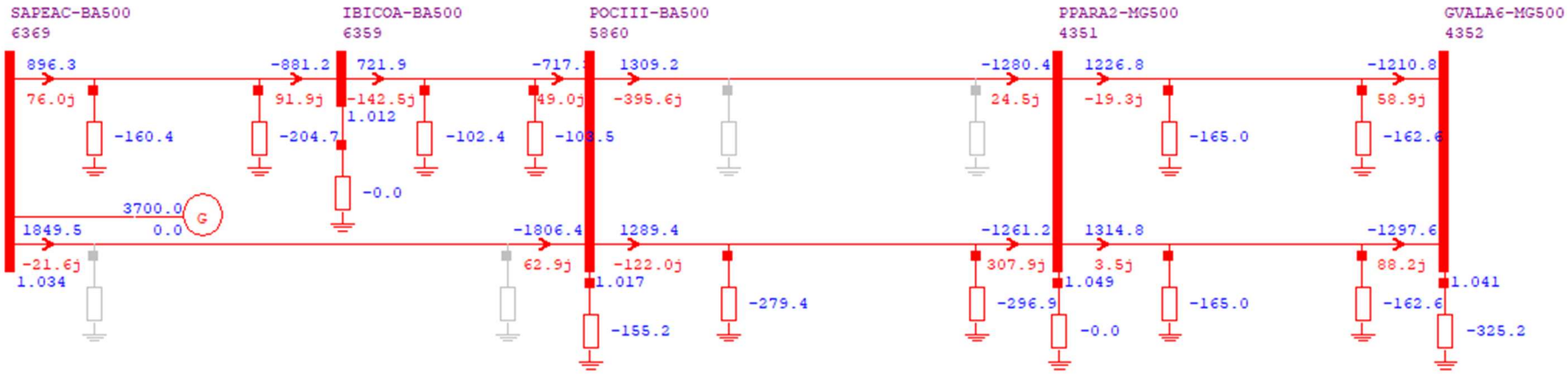
Fonte: O autor (2025).

Figura 32 - Sistema em estudo após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Sapeaçu



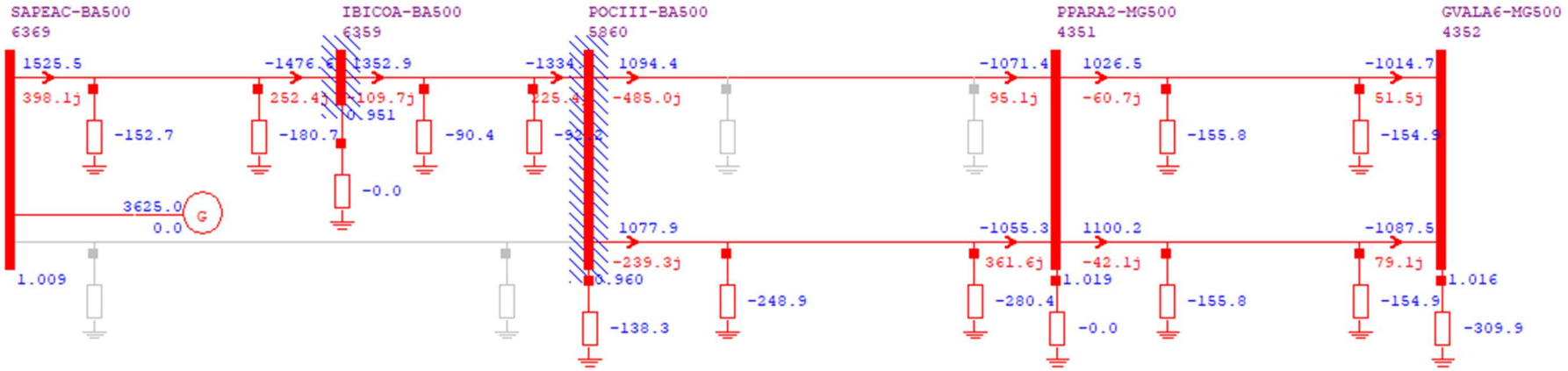
Fonte: O autor (2025).

Figura 33 - Cálculo de MT do sistema íntegro após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Sapeaçu



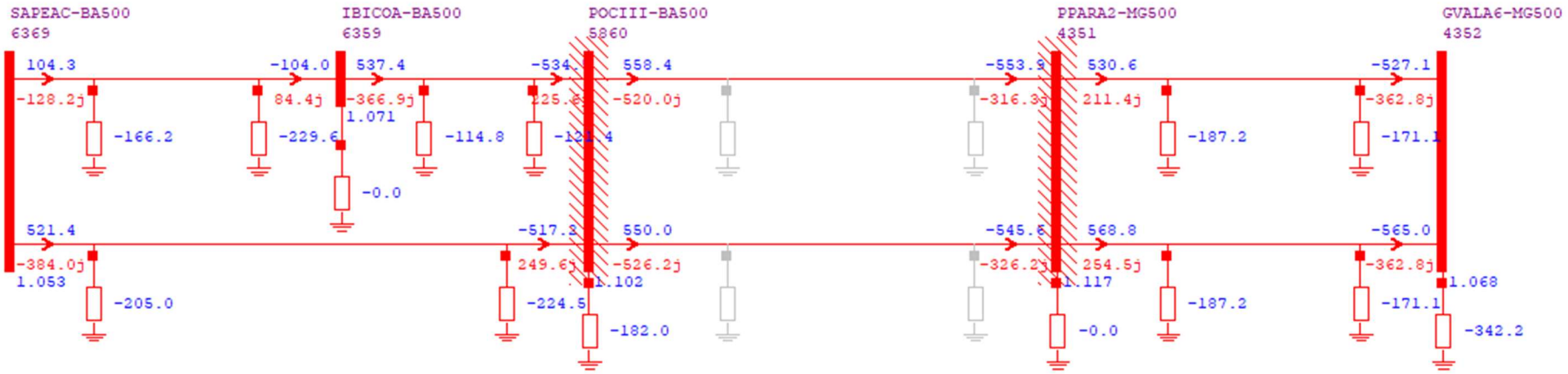
Fonte: O autor (2025).

Figura 34 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após desligamento dos RL das LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e Poções III - Sapeaçu



Fonte: O autor (2025).

Figura 35 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1 e C2

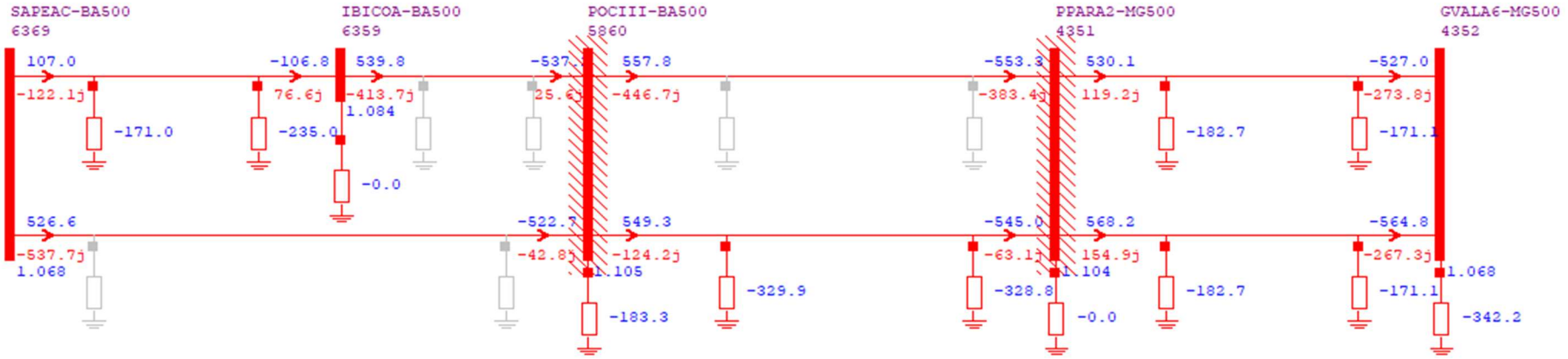


Fonte: O autor (2025).

Conforme pode ser observado na Tabela 9, o maior ganho de MT, dentre as situações analisadas, foi obtido quando da substituição dos RL da LT Poções III – Sapeaçu. Dado que, neste cenário, o fator limitante passou a ser a tensão no barramento de Ibicoara, o processo irá se repetir, tendo como alvo os circuitos adjacentes à esta subestação. Neste contexto, há apenas dois circuitos possíveis para análise: as LT Poções III – Ibicoara e Ibicoara – Sapeaçu, entretanto não foi possível seguir com esta análise pois em ambos os casos havia violação dos limites de tensão frente ao desligamento dos RL correspondentes, impossibilitando a execução da rotina vide item 2.3, como pode ser checado na Figura 36 e na Figura 37.

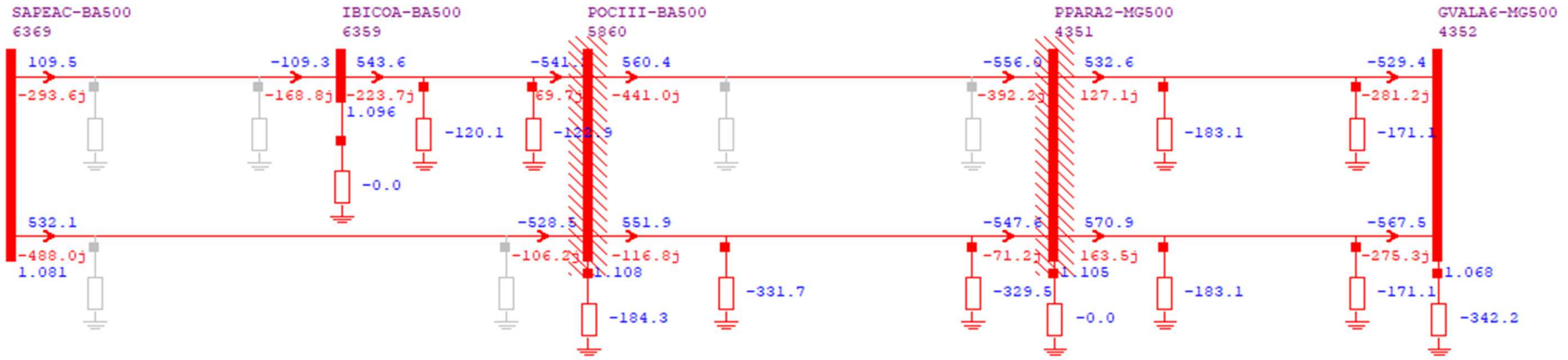
Tais resultados demonstram a inviabilidade de prosseguir esta análise usando a estratégia de desligamento dos RL. Essa adversidade foi superada conforme descrito no tópico seguinte.

Figura 36 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1, Poções III – Sapeaçu e Poções III - Ibicoara



Fonte: O autor (2025).

Figura 37 - Sistema em estudo após desligamento dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1, Poções III – Sapeaçu e Ibicoara - Sapeaçu



Fonte: O autor (2025).

4.2 RSN Modelados Como Compensadores Estáticos

Conforme descrito no item 2.2.3, os RSN também podem ser modelados como compensadores estáticos. Esta estratégia permitiria não apenas simular o comportamento dos RSN nos momentos de elevada carga, como no caso prévio, mas nos de carga leve também, solucionando a adversidade da sobretensão nos casos base, encontrada na abordagem anterior. Assim, o processo de seleção e substituição dos RL adotado antes foi reiniciado, partindo do cálculo de MT realizado no sistema original, representado na Figura 14 e cujos resultados foram resumidos na Tabela 4.

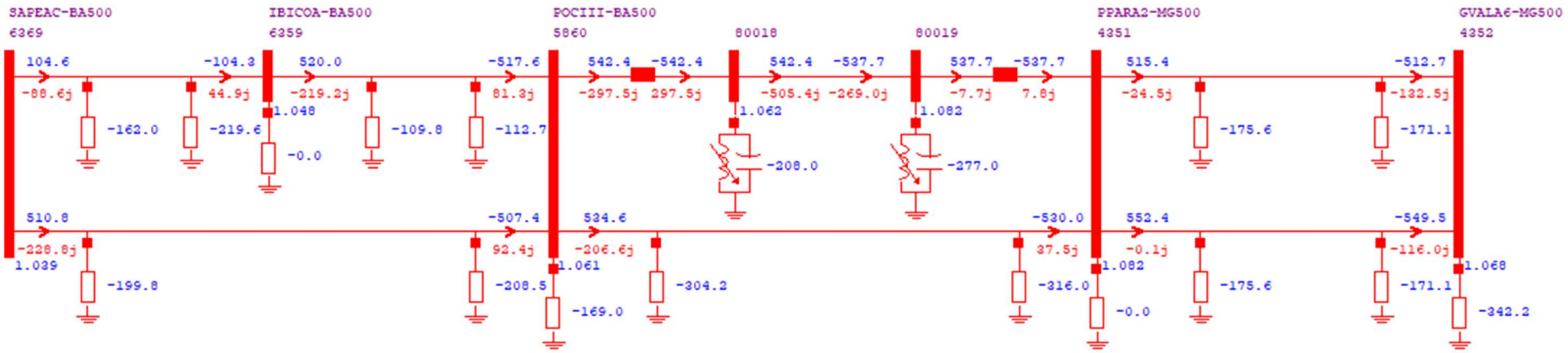
Os dados obtidos com essa aplicação podem ser examinados a seguir, na Tabela 10, na qual fica clara a semelhança entre os resultados do atual método empregado e os anteriores, expostos da Tabela 5 até a Tabela 8. De modo semelhante, o primeiro circuito selecionado permanece sendo a LT Poções III – Padre Paraíso II C1, cujos diagramas unifilares correspondentes podem ser conferidos da Figura 38 até a Figura 40, na sequência.

Tabela 10 - MT do sistema após substituição dos RL de diferentes LT adjacentes a Poções III – Primeira substituição

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
Poções III - Ibicoara	3100	3025	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C1
Poções III - Sapeaçu	3200	3125	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C2
Poções III - Padre Paraíso II C1	3400	3325	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C2
Poções III - Padre Paraíso II C2	3400	3325	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C2

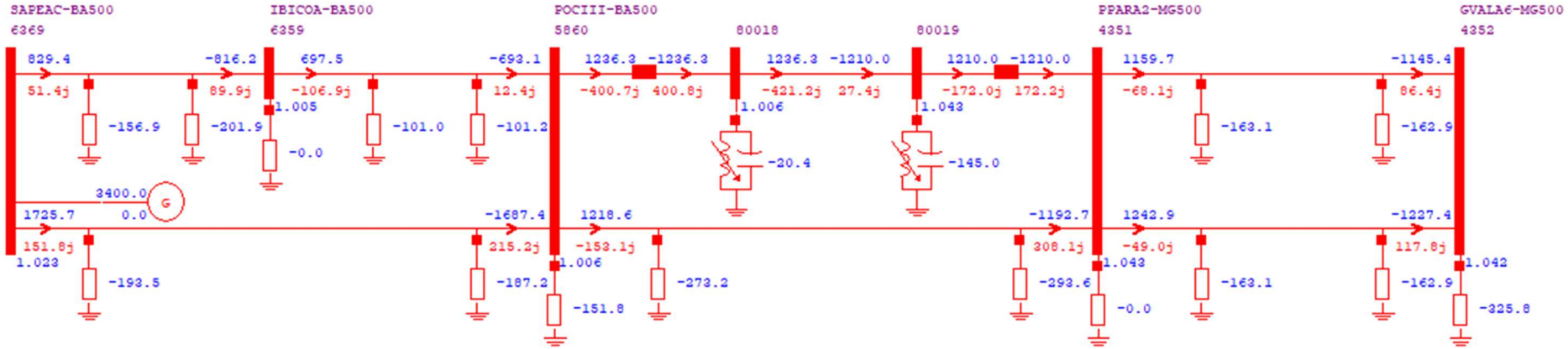
Fonte: O autor (2025).

Figura 38 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1



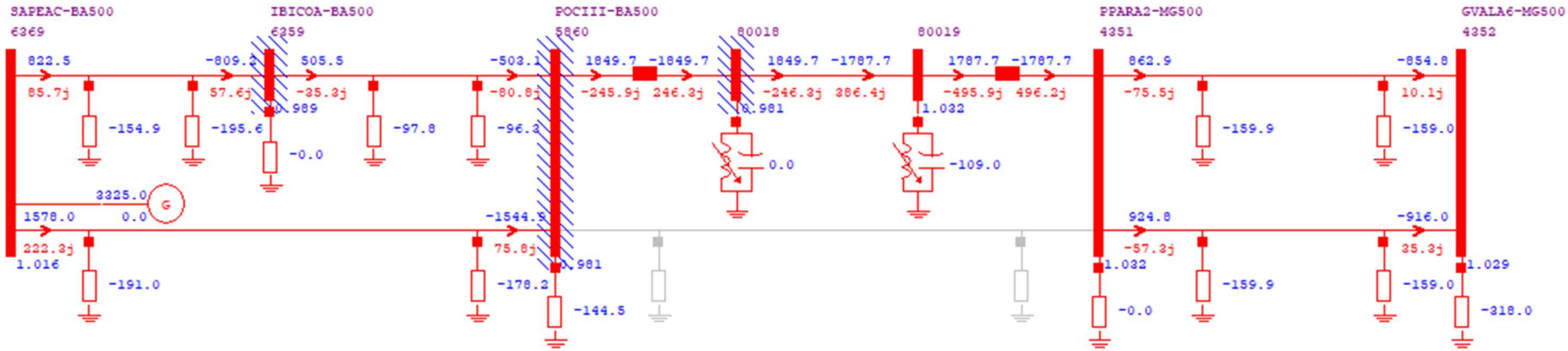
Fonte: O autor (2025).

Figura 39 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1



Fonte: O autor (2025).

Figura 40 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C1



Fonte: O autor (2025)

Partindo do cenário desta substituição, e considerando que o fator limitante para este caso permaneceu sendo a tensão no barramento de $500\,kV$ da subestação de Poções III, outra LT adjacente a este barramento foi escolhida para que também tenha seus RL trocados por RSN. Os resultados dos cálculos de MT podem ser verificados na Tabela 11, e os diagramas unifilares correspondentes estão disponíveis da Figura 41 até a Figura 43.

É importante ressaltar que o atual procedimento de representação dos RSN viabilizou a análise do cenário de substituição dos RL de ambos os circuitos que conectam Poções III e Padre Paraíso II, o qual não foi viável na abordagem adotada previamente, conforme destacado no item 4.1.

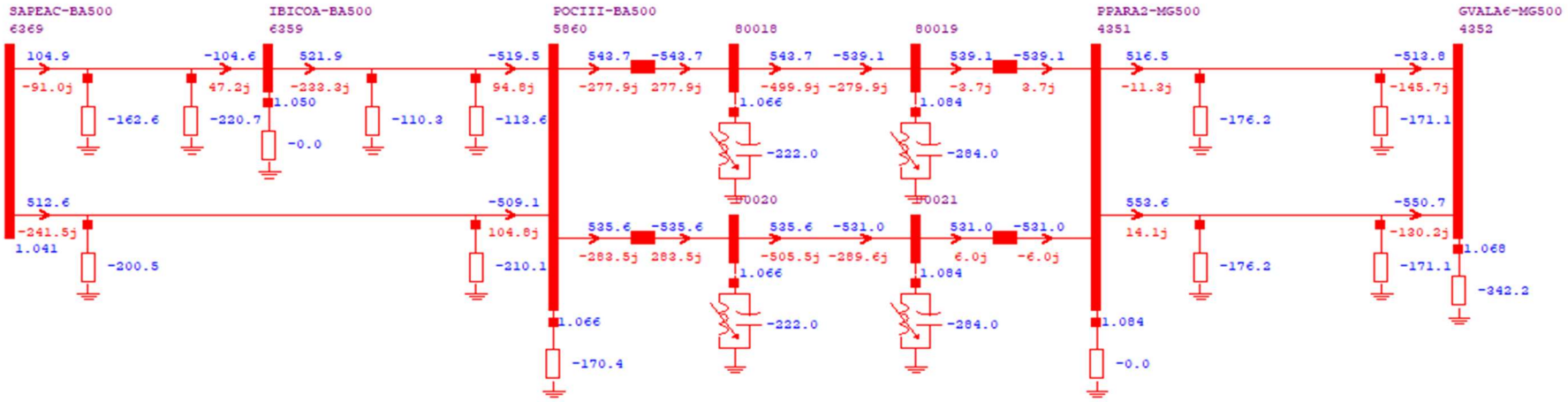
Tabela 11 - MT do sistema após substituição dos RL de diferentes LT adjacentes a Poções III – Segunda substituição

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro [MW]	MT do sistema com contingência [MW]	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
LT Poções III - Ibicoara	3600	3525	Tensão	Poções III	LT Poções III - Padre Paraíso II C2
LT Poções III - Sapeaçu	3600	3575	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu
LT Poções III - Padre Paraíso II C2	3700	3670	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu

Fonte: O autor (2025).

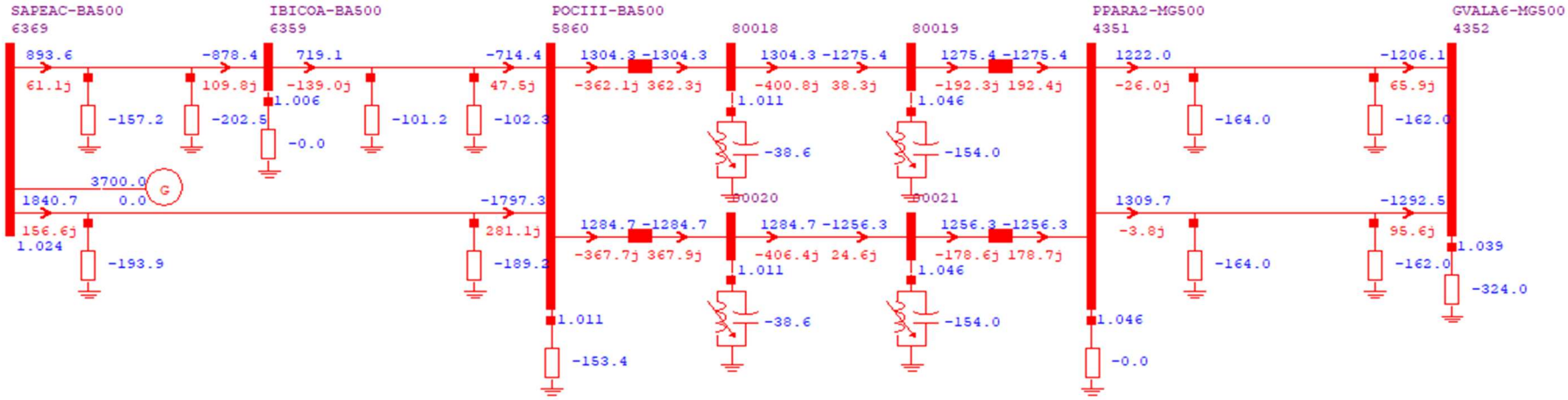
.

Figura 41 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 – Segunda substituição



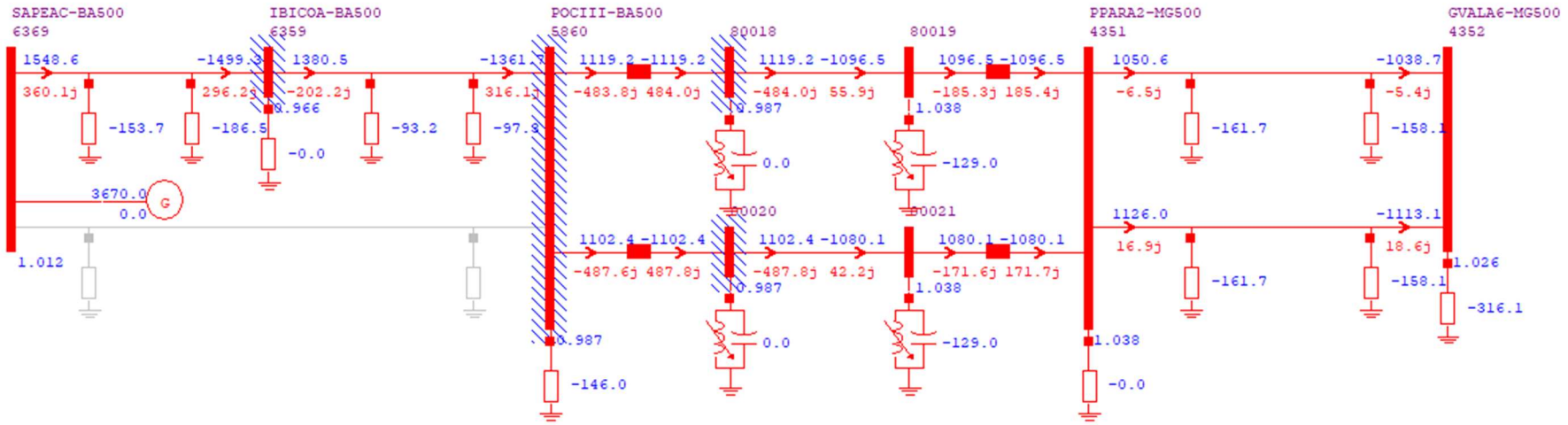
Fonte: O autor (2025).

Figura 42 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 – Segunda substituição



Fonte: O autor (2025).

Figura 43 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Padre Paraíso II C2 – Segunda substituição



Fonte: O autor (2025).

Dando seguimento, segue da Tabela 12 até a Tabela 14 o resultado da análise do terceiro, quarto e quinto passos do processo, respectivamente. Os diagramas correspondentes estão disponíveis da Figura 44 até a Figura 52.

Tabela 12 - MT do sistema após substituição dos RL de diferentes LT adjacentes a Ibicoara – Terceira substituição

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
LT Poções III - Ibicoara	3900	3870	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu
LT Ibicoara - Sapeaçu	4000	3975	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu

Fonte: O autor (2025).

Tabela 13 - MT do sistema após substituição dos RL da última LT adjacente a Ibicoara – Quarta substituição

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
LT Poções III - Ibicoara	4200	4125	Tensão	Poções III	LT Poções III – Padre Paraíso II C1

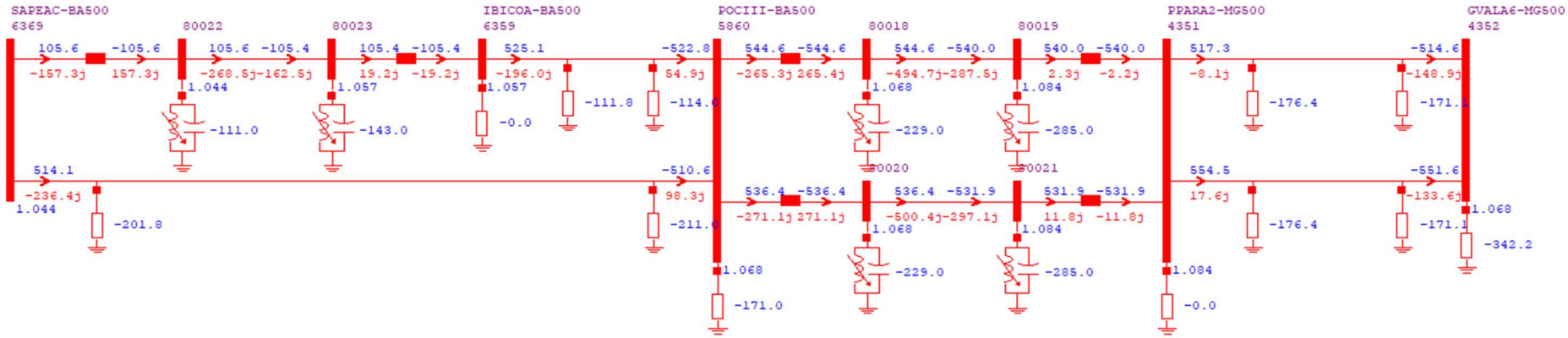
Fonte: O autor (2025).

Tabela 14 - MT do sistema após substituição dos RL da última LT adjacente a Poções III – Quinta substituição

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
LT Poções III - Sapeaçu	4400	4345	Tensão	Poções III	LT Poções III – Padre Paraíso II C1

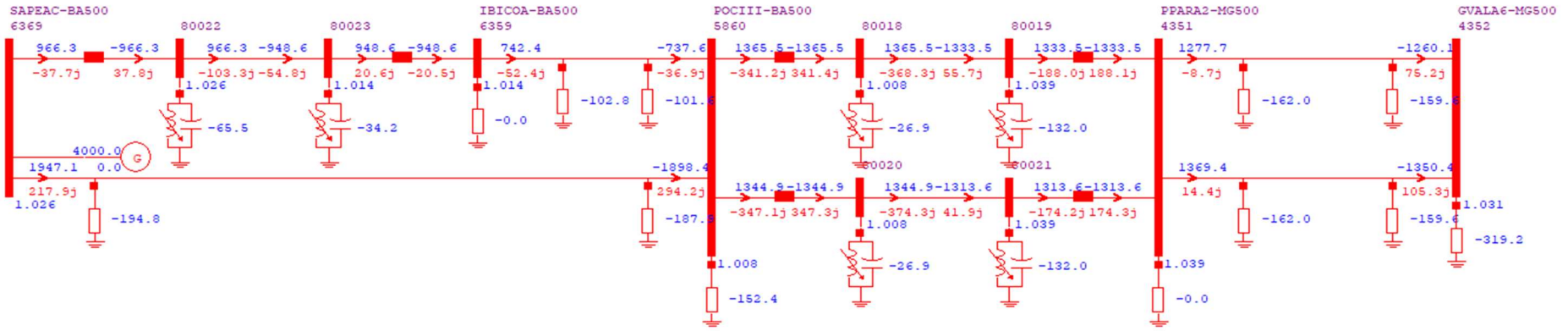
. Fonte: O autor (2025).

Figura 44 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Ibicoara – Sapeaçu – Terceira substituição



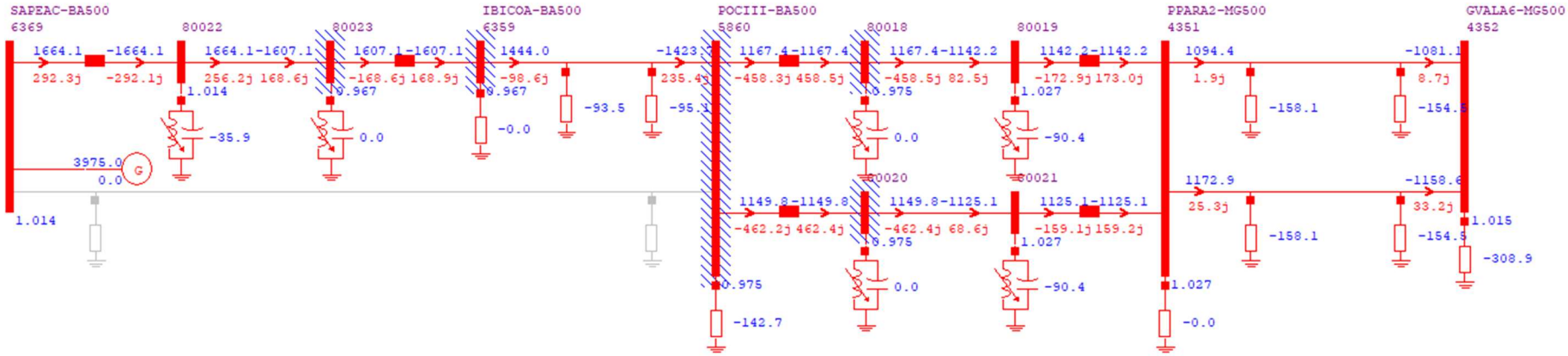
Fonte: O autor (2025).

Figura 45 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Ibicoara – Sapeaçu – Terceira substituição



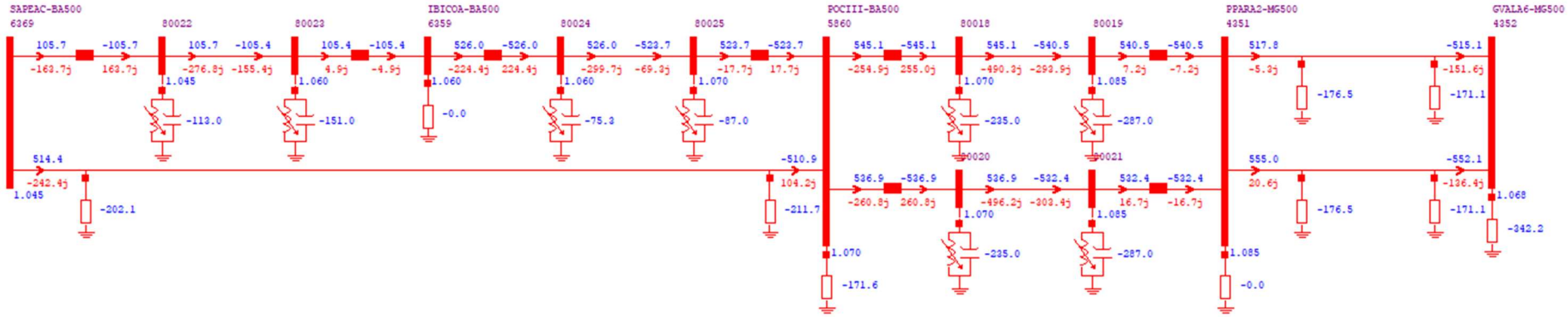
Fonte: O autor (2025).

Figura 46 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Ibicoara – Sapeaçu – Terceira substituição



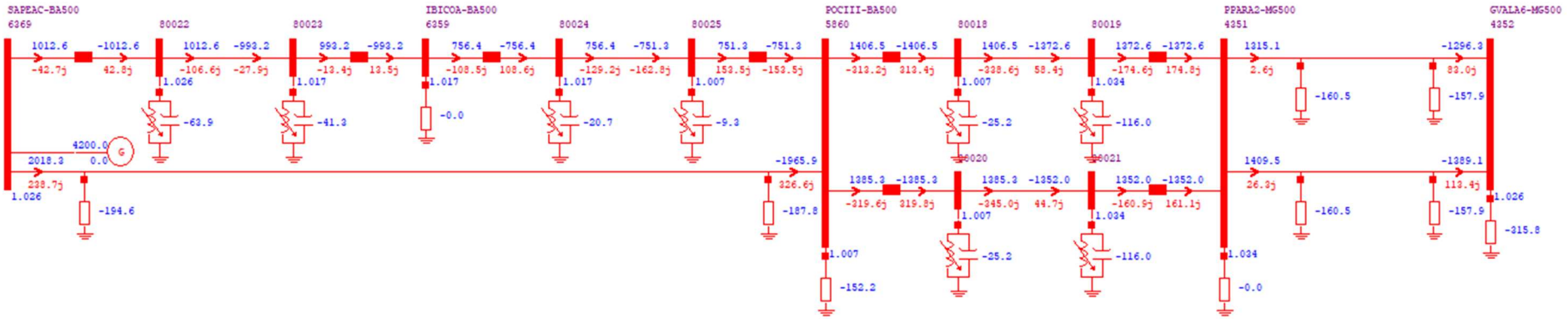
Fonte: O autor (2025).

Figura 47 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Ibicoara – Quarta substituição



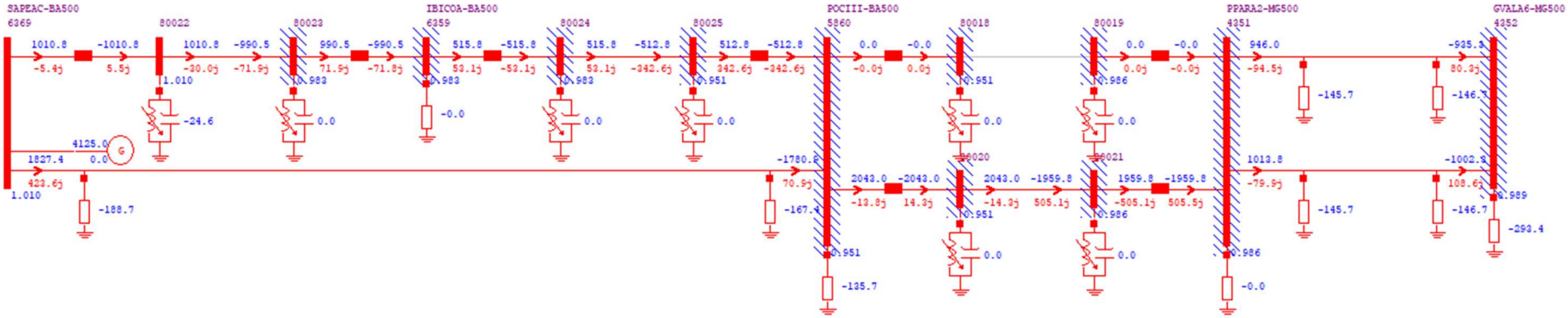
Fonte: O autor (2025).

Figura 48 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Ibicoara – Quarta substituição



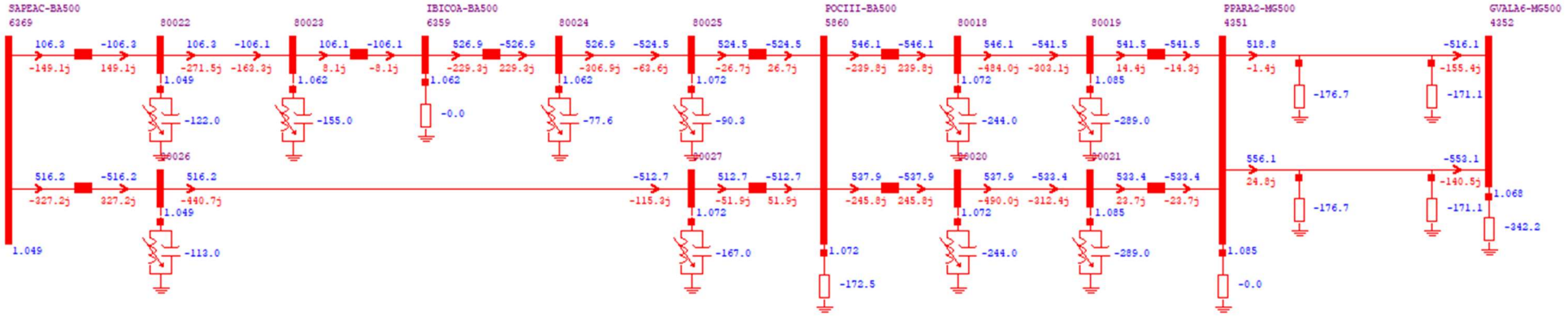
Fonte: O autor (2025).

Figura 49 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Ibicoara – Quarta substituição



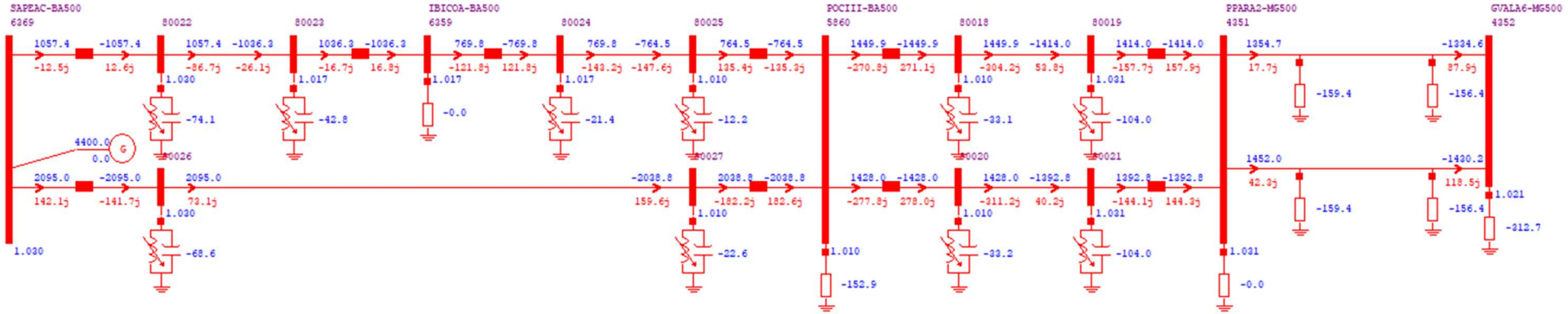
Fonte: O autor (2025).

Figura 50 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Poções III – Sapeaçu – Quinta substituição



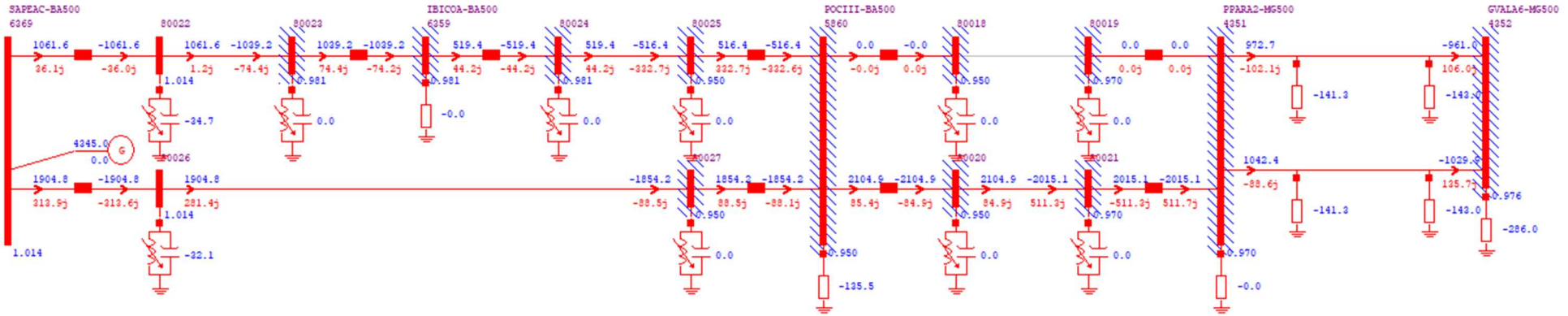
Fonte: O autor (2025).

Figura 51 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Poções III – Sapeaçu – Quinta substituição



Fonte: O autor (2025).

Figura 52 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Poções III – Sapeaçu – Quinta substituição



Fonte: O autor (2025).

Conforme pode ser conferido na Tabela 14, apesar da substituição de todos os RL das LT adjacentes a Poções III relevantes neste estudo, a tensão neste barramento permanece como fator limitante do cálculo de MT. Frente a impossibilidade de seguir atuando sobre equipamento limitante, foi definido substituir os RL das duas LT restantes neste recorte do SIN, isto é, os circuitos que interligam as subestações de Padre Paraíso II e Governador Valadares VI. Os resultados da execução da rotina de cálculo de MT são apresentados na Tabela 15 e na Tabela 16, e os respectivos diagramas podem ser checados da Figura 53 até a Figura 58. Convém enfatizar que a LT selecionada na sexta substituição foi arbitrária, visto que ambas as opções resultavam nos mesmos valores de MT, tal como ocorreu na primeira substituição.

Tabela 15 - MT do sistema após substituição dos RL das LT que conectam Padre Paraíso II a Governador Valadares VI – Sexta substituição

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
LT Padre Paraíso II - Governador Valadares VI C1	4500	4450	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu
LT Padre Paraíso II - Governador Valadares VI C2	4500	4450	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu

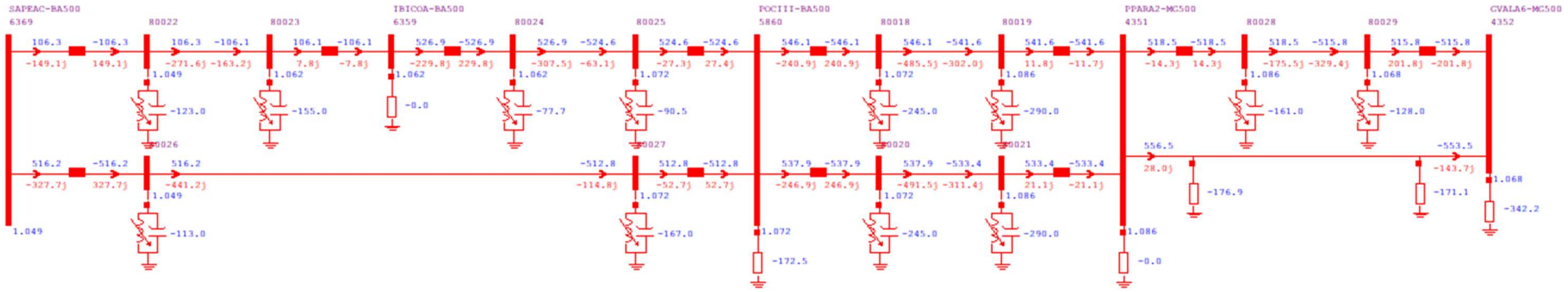
Fonte: O autor (2025).

Tabela 16 - MT do sistema após substituição dos RL da última LT que conecta Padre Paraíso II a Governador Valadares VI – Sétima substituição

LT alvo da substituição	MT do sistema íntegro $[MW]$	MT do sistema com contingência $[MW]$	Fator limitante	Equipamento limitante (barramento ou LT)	Contingência limitante
LT Padre Paraíso II - Governador Valadares VI C2	4600	4500	Tensão	Ibicoara	LT Poções III - Sapeaçu

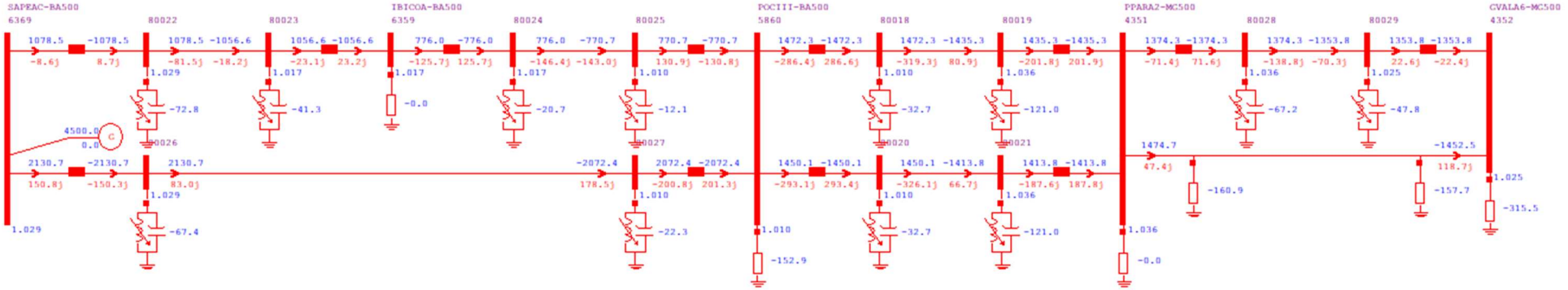
. Fonte: O autor (2025).

Figura 53 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C1 – Sexta substituição



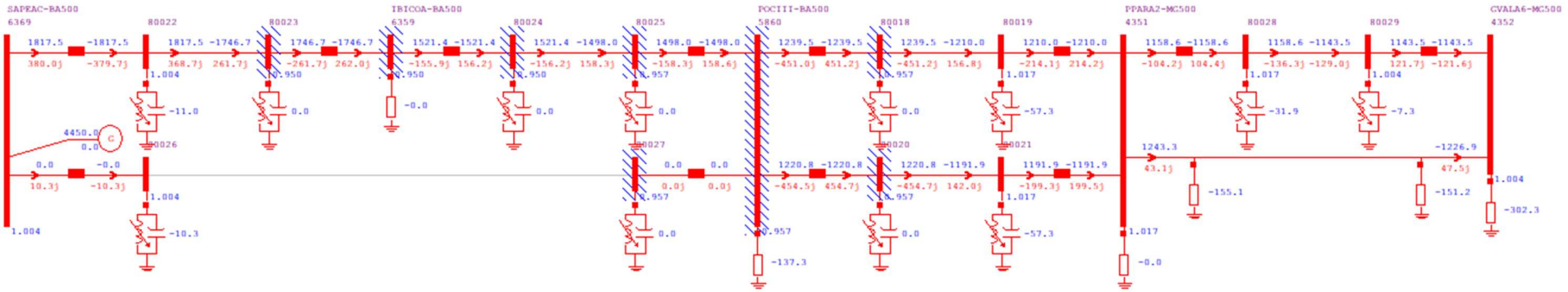
Fonte: O autor (2025).

Figura 54 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C1 – Sexta substituição



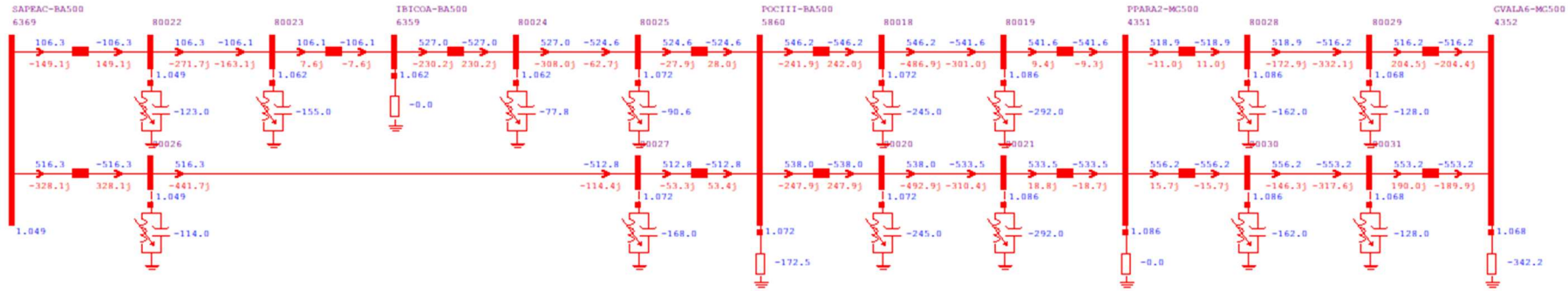
Fonte: O autor (2025).

Figura 55 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C1 – Sexta substituição



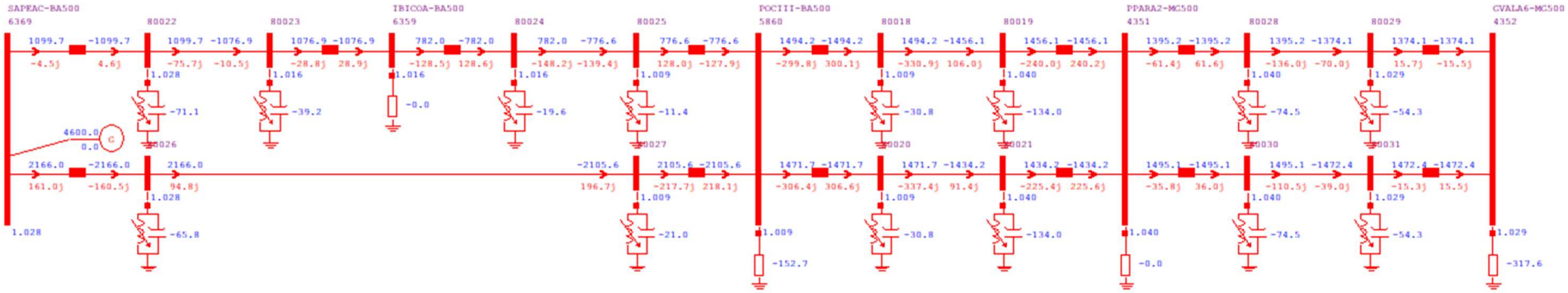
Fonte: O autor (2025).

Figura 56 - Sistema em estudo após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C2 – Sétima substituição



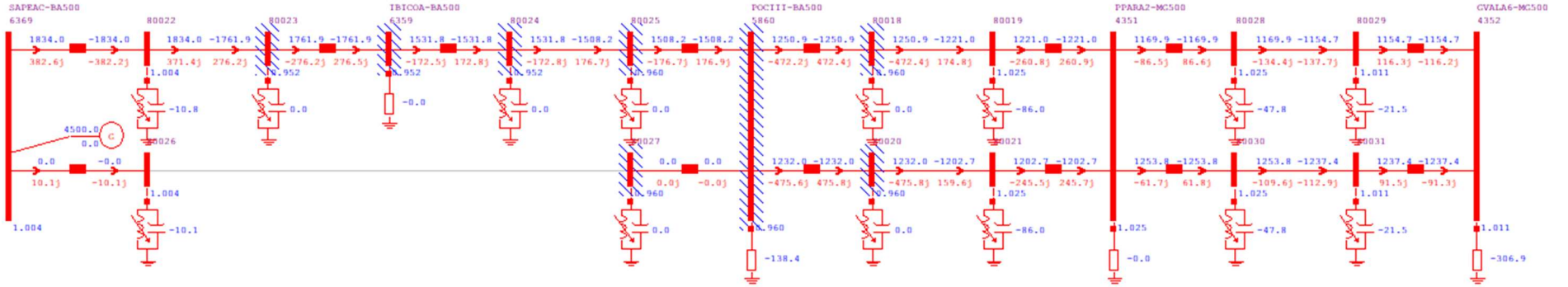
Fonte: O autor (2025).

Figura 57 - Cálculo de MT do sistema íntegro após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C2 – Sétima substituição



Fonte: O autor (2025).

Figura 58 - Cálculo de MT do sistema em condição de contingência limitante após substituição dos RL da LT Padre Paraíso II – Governador Valadares VI C2 – Sétima substituição



Fonte: O autor (2025).

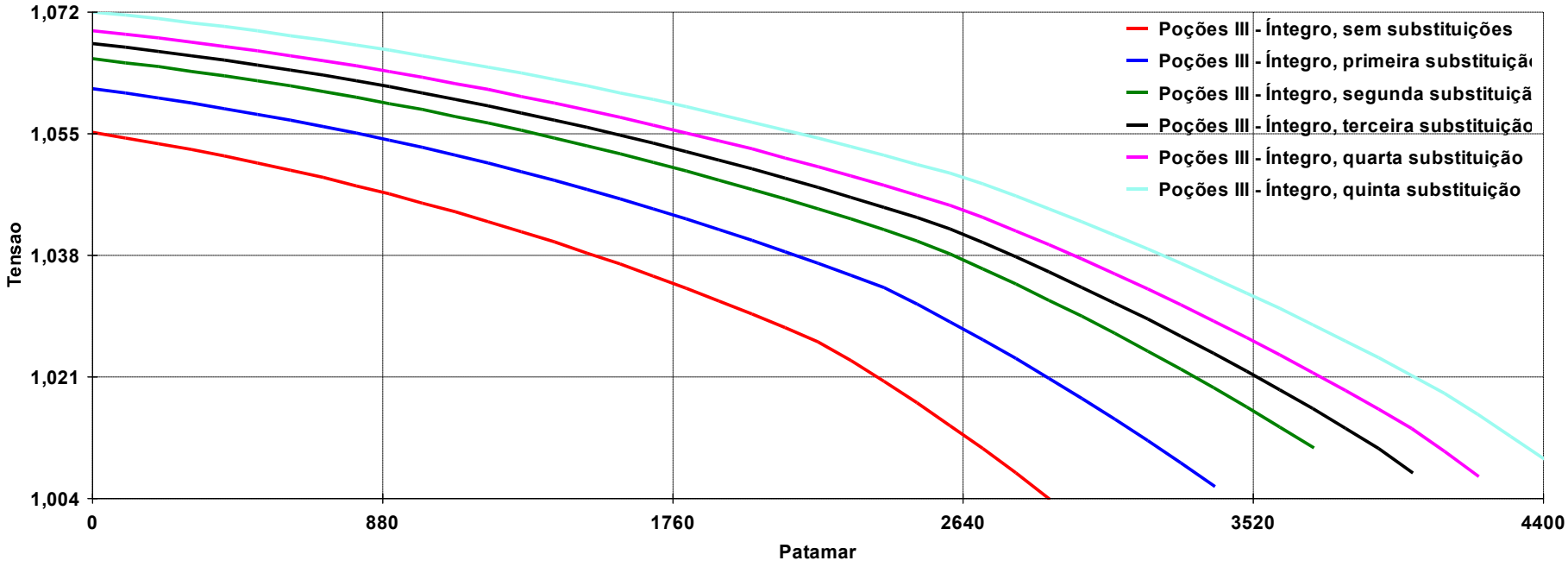
4.3 Análise das Curvas de Estabilidade PxV

Outra forma de analisar os resultados obtidos nas simulações pode ser por meio da análise das curvas de estabilidade estática dos barramentos, as quais são geradas automaticamente após a execução da rotina de cálculo de MT. Para visualizar tais curvas, foi utilizado o programa PlotCEPEL, também desenvolvido pelo Cepel, na versão 5.0.3. Considerando o fato de que nas etapas anteriores foram verificados problemas relacionados aos limites de tensão apenas em Poções III e Ibicoara, esta breve análise será restrita às curvas de estabilidade desses barramentos.

Conforme pode ser conferido na Figura 59, o ganho de MT em sistema íntegro no barramento de Poções III a cada uma das cinco primeiras substituições de RL é considerável, entretanto isso não é verdade para as duas últimas aplicações, referentes aos circuitos entre Padre Paraíso II e Governador Valadares VI, cujo acréscimo de margem foi irrisório, vide Figura 60. O resultado obtido é semelhante para situações de sistema degradado, embora as curvas apresentem diferenças mais acentuadas em função das diferentes contingências limitantes observadas em cada substituição, como pode ser verificado na Figura 61 e na Figura 62.

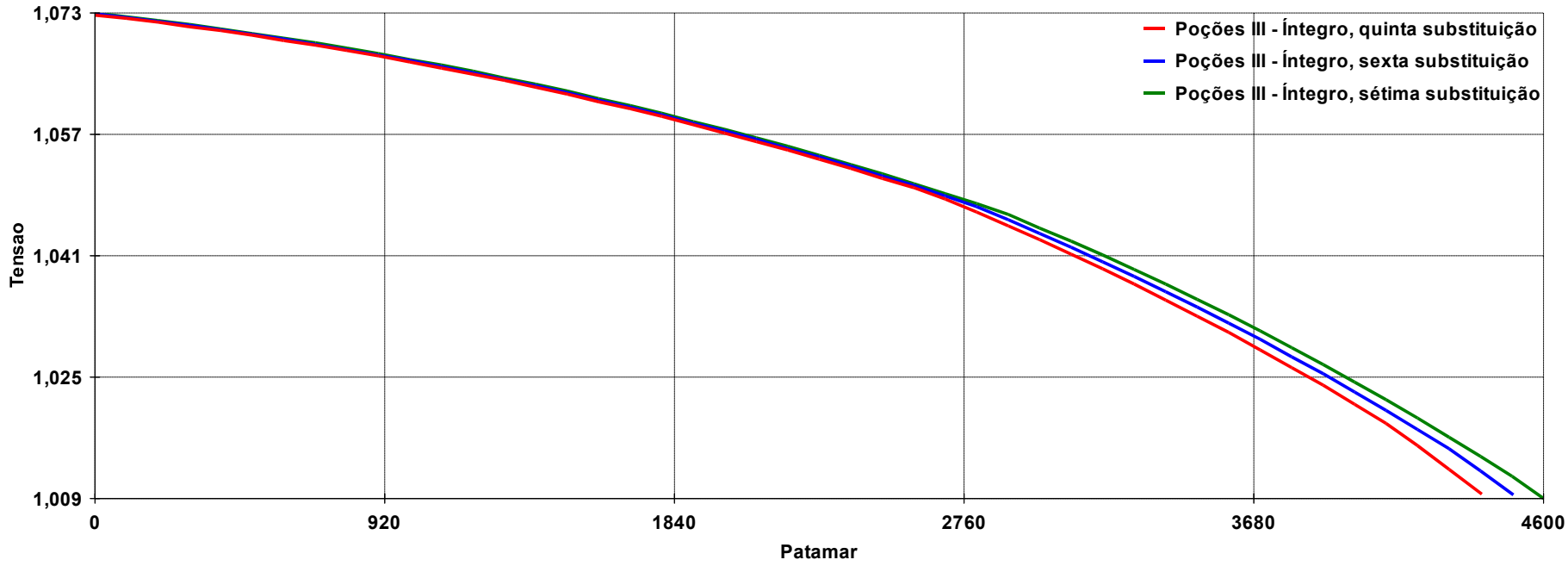
No que se refere ao barramento de Ibicoara, os resultados obtidos são análogos e podem ser conferidos na Figura 63 para o caso base e as cinco primeiras substituições, enquanto na Figura 64 são apresentados os ganhos de MT das três últimas configurações do sistema estudado em estado íntegro. Os casos referentes à degradação do sistema por contingência limitante estão disponíveis na Figura 65 e na Figura 66.

Figura 59 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema íntegro – Primeira a quinta substituições



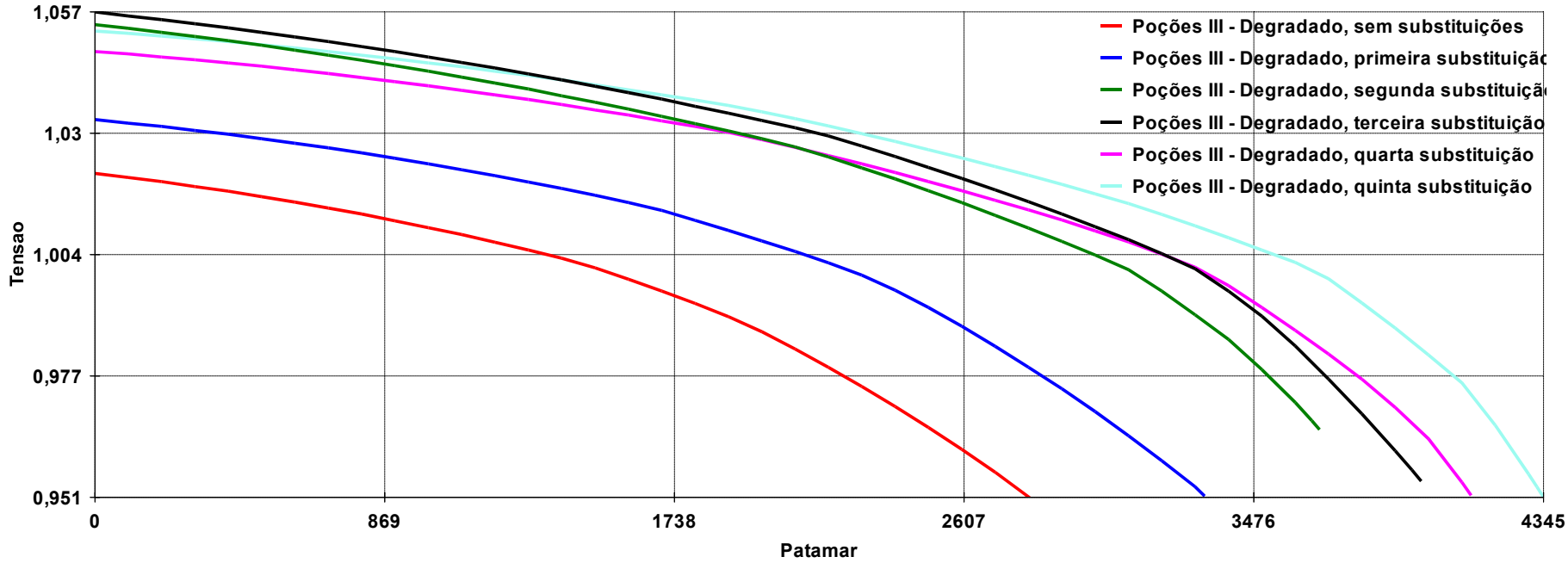
Fonte: O autor (2025).

Figura 60 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema íntegro – Quinta a sétima substituições



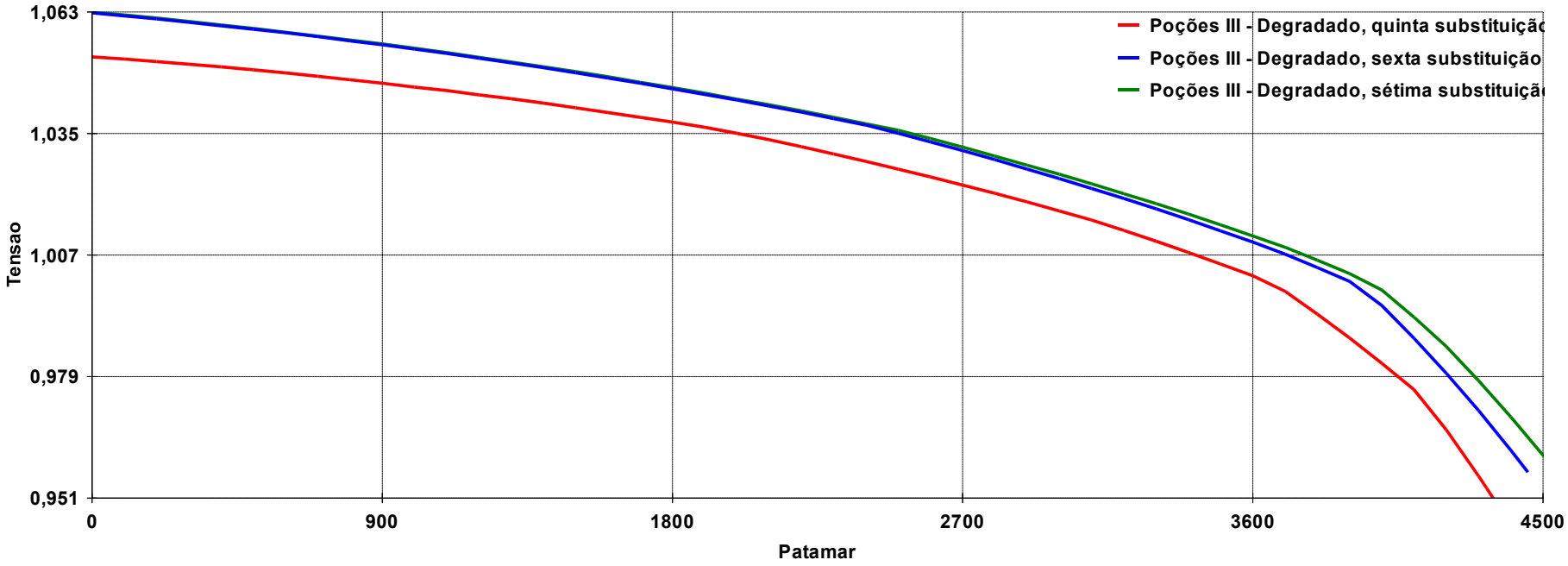
Fonte: O autor (2025).

Figura 61 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema degradado – Primeira a quinta substituições



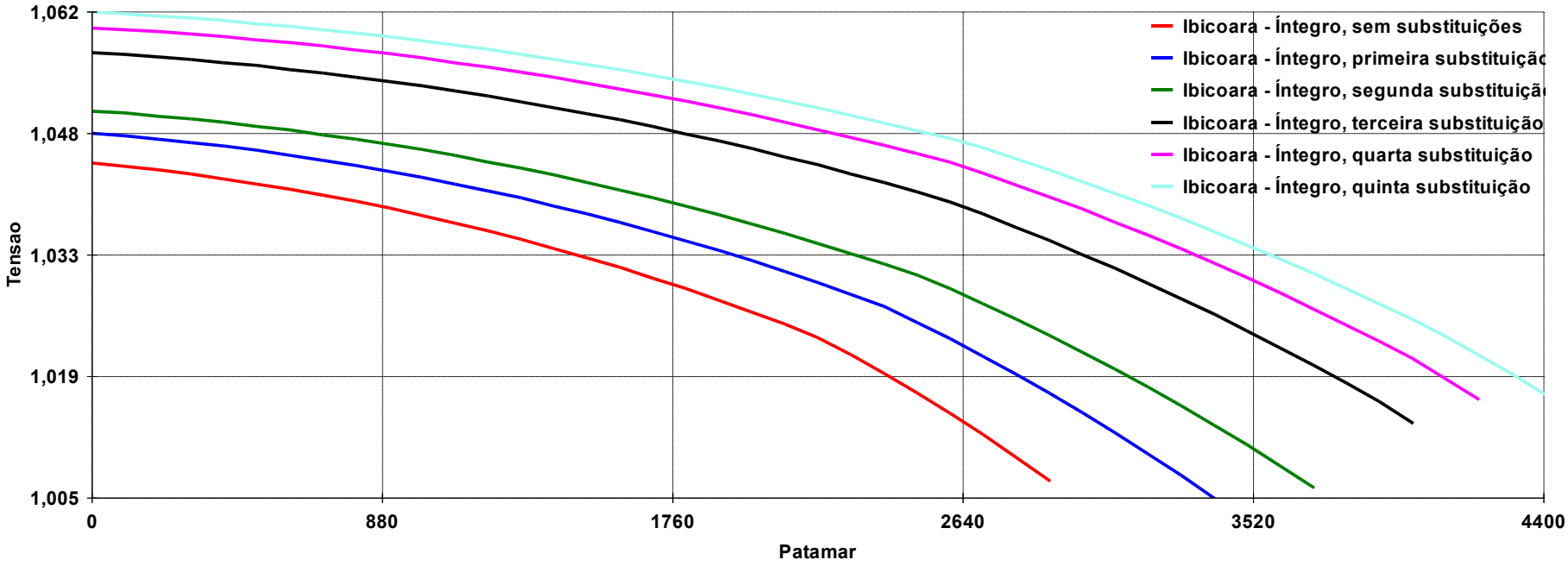
Fonte: O autor (2025).

Figura 62 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema degradado – Quinta a sétima substituições



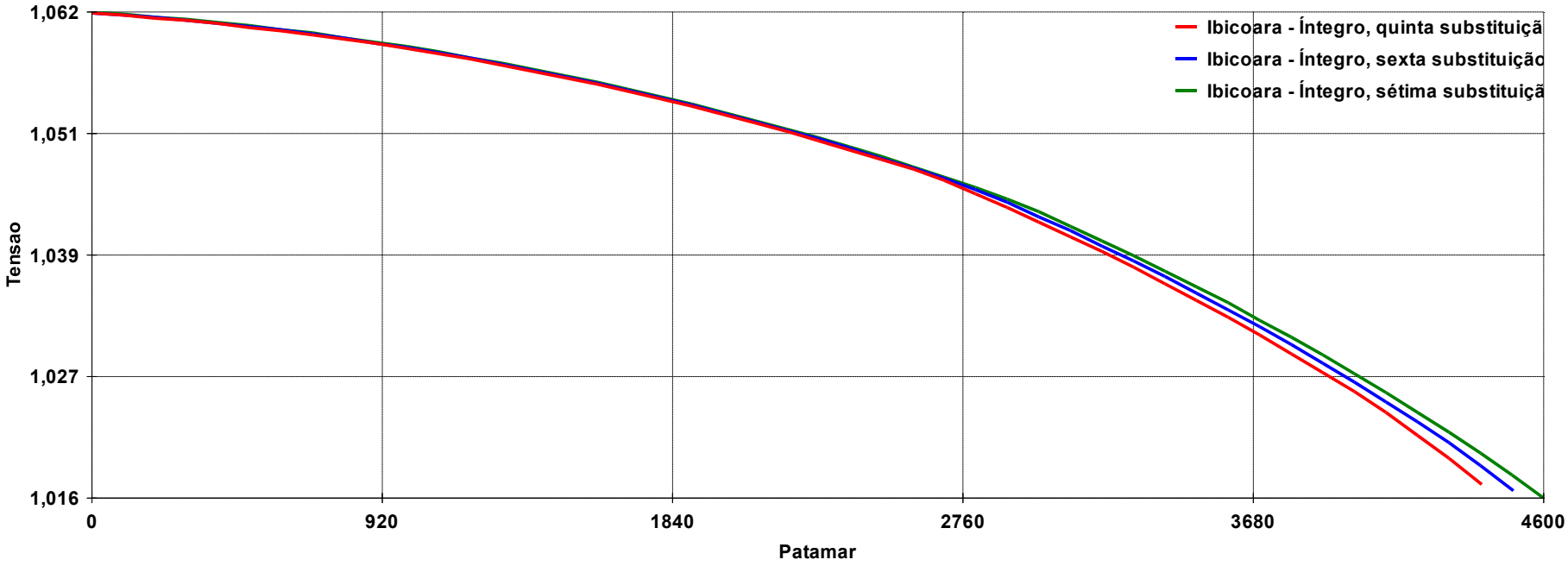
Fonte: O autor (2025).

Figura 63 - Curvas de estabilidade para Ibicoara – Sistema íntegro – Primeira a quinta substituições



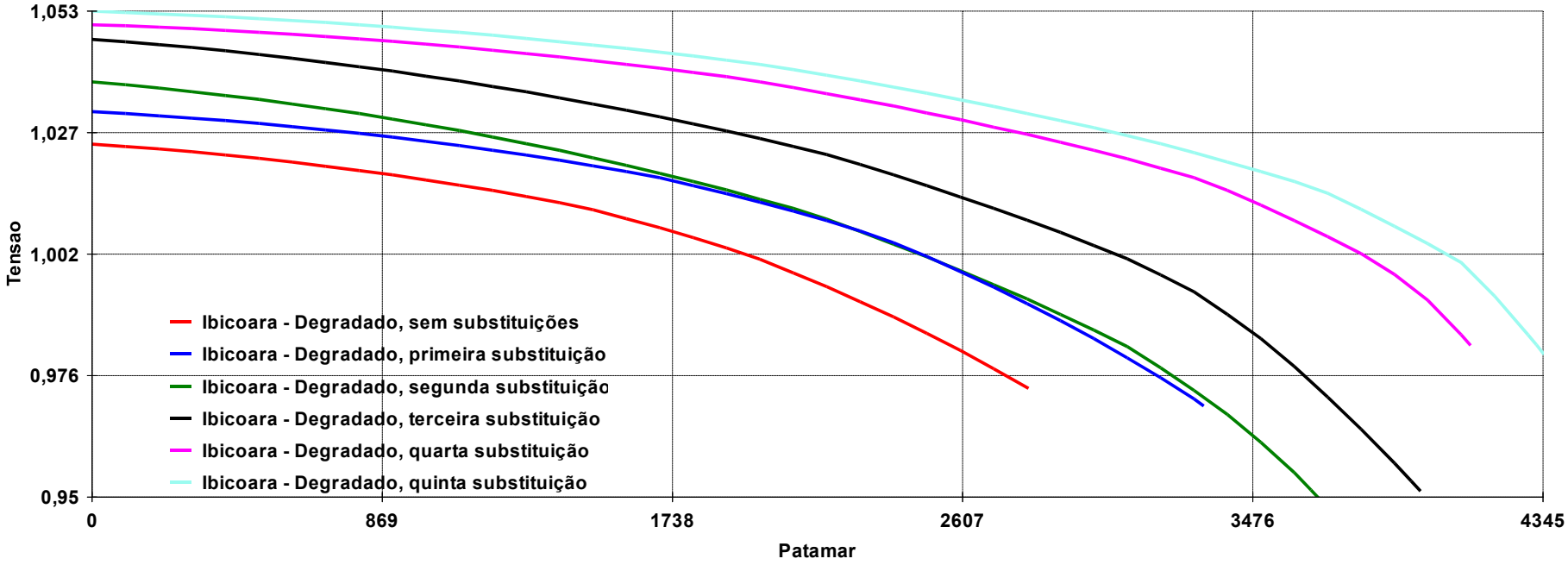
Fonte: O autor (2025).

Figura 64 - Curvas de estabilidade para Ibicoara – Sistema íntegro – Quinta a sétima substituições



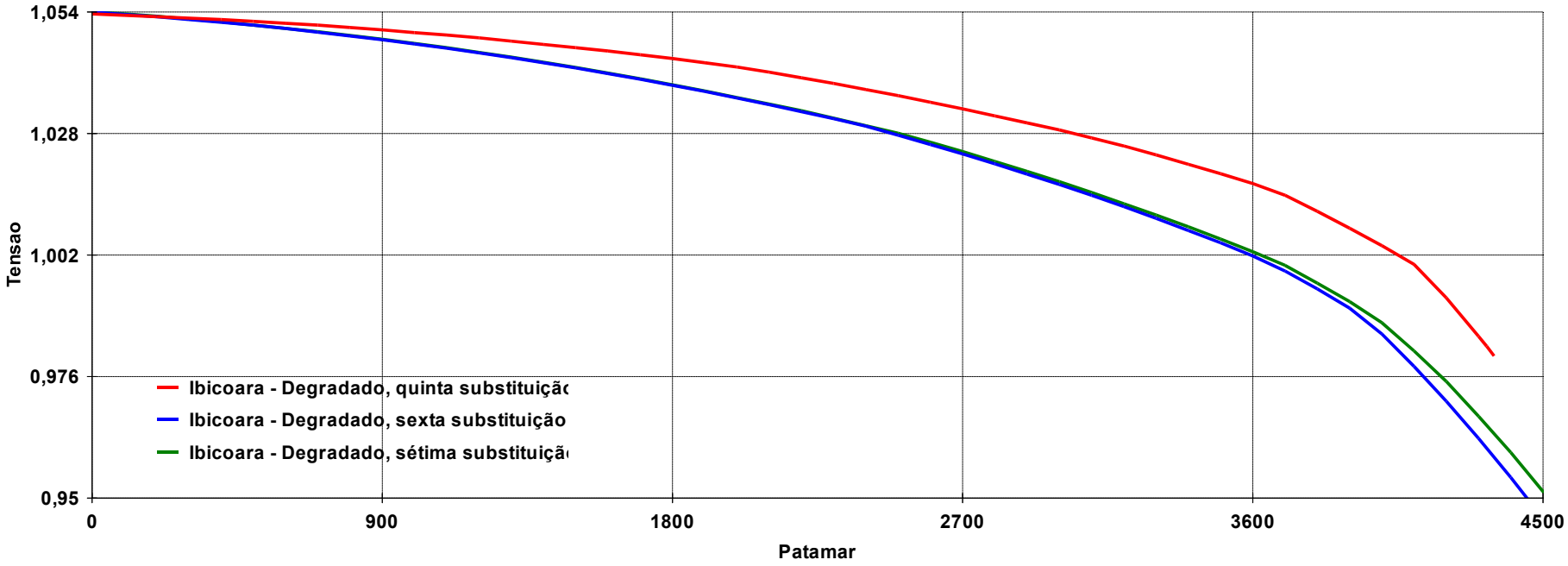
Fonte: O autor (2025).

Figura 65 - Curvas de estabilidade para Ibicoara – Sistema degradado – Primeira a quinta substituições



Fonte: O autor (2025).

Figura 66 - Curvas de estabilidade para Poções III – Sistema degradado – Quinta a sétima substituições



Fonte: O autor (2025).

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

No que se refere aos resultados deste trabalho, após a substituição de todos os RL nos terminais das LT deste recorte do SIN, foi possível obter uma margem de $4400\ MW$ para sistema íntegro, como pode ser conferido na Tabela 14, resultando num ganho de $51{,}72\%$ frente aos valores calculados para o sistema original, conforme apresentado na Tabela 4. Com respeito à análise em cenário de contingência limitante, os ganhos foram ainda mais expressivos, culminando em valores $55{,}18\%$ superiores aos resultados obtidos inicialmente.

As curvas de estabilidade estática proporcionaram uma importante interpretação dos valores de MT, pois tornaram visível o ganho de margem do sistema após diferentes configurações, além de viabilizarem a observação do risco de colapso de tensão do sistema a partir da proximidade entre o ponto de operação do barramento e o ponto de inflexão da curva PxV.

Tais resultados somados às diversas vantagens já citadas dos RSN, como robustez, melhor regulação de tensão e custo similares aos reatores tradicionais, reforçam os possíveis ganhos da aplicação deste equipamento nos sistemas elétricos de potência, como o SIN.

5.1 Propostas de Continuidade

No que tange à possibilidade deste trabalho encorajar pesquisas futuras, algumas recomendações de temas são:

- Análise dos impactos da seleção de diferentes barramentos do sistema para função de referência em execuções de equivalente de circuito;
- Análise harmônica e transitória dos RSN, com ênfase em cenários de suprimento não ideal de tensão, tais como desequilíbrios entre as fases;
- Análise dos possíveis ganhos de MT decorrentes do uso de RSN em substituição aos RL em outros recortes do SIN.

REFERÊNCIAS

1. FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica:** linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente. Rio de Janeiro: LTC, v. I, 1977.

2. FERNANDES, R. P. et al. **Utilização de Ferramenta para Cálculo Automático de Margem de Transmissão em Estudos para Leilões de Energia**. XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte - MG: [s.n.]. 2019.

3. MELO, M. Q. et al. **Avaliação do Efeito Ferranti em Linhas Aéreas de Transmissão de Potência**. [S.l.]: [s.n.]. Janeiro 2020.

4. FRONTIN, S. D. O. **Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações**. Brasília: Goya Editora LTDA, 2013.

5. ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.3 - Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos. **Procedimentos de Rede**, 2024. Disponivel em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 28 dezembro 2024.

6. CARVALHO JÚNIOR, M. A. D.; FONTE, L. A. M. D. **Steady State and Transient Voltage Control on Long EHV Transmission Lines**. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 - IEEE/PES. Atlanta Georgia - USA: [s.n.]. 2001. p. 409-414.

7. CARVALHO JÚNIOR, M. A. D. et al. **Modeling and Specification of Naturally Saturated Reactors for Steady-State**. XI SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Belém PA: [s.n.]. 2009.

8. TYLL, H. K.; SCHETTLER, F. **Historical overview on dynamic reactive power compensation solutions from the begin of AC power transmission towards present applications**. IEEE Power Systems Conference and Exposition. Seattle, WA: [s.n.]. 2009.

9. BRASIL, D. D. O. C. D. **Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão**. Tese de Mestrado - UFPE. Recife. 1996.

10. BRASIL, D. D. O. C. D.; CARVALHO JÚNIOR, M. A. D. **Application of Saturated Reactors on Power Transmission System**. IPST '95 - International Conference on Power Systems Transients. Lisbon: [s.n.]. 1995. p. 371-376.

11. CARVALHO JÚNIOR, M. A. D.; FONTE, L. A. M. D. **Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines by Saturated Reactors**. 14th PSCC - Power Systems Computation Conference. Sevilla, Spain: [s.n.]. 2002.

12. MAIA, M. J. A. et al. **Estudos de Estado Permanente, Transitórios e Harmônicos de um Protótipo de Reator de Saturação Natural**. XIX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro RJ: [s.n.]. 2007.

13. MAIA, M. J. A. et al. **Reator de Saturação Natural:** Estudos para o Projeto de um Protótipo. XIX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro RJ: [s.n.]. 2007.

14. VASCONCELLOS, A. B. D. et al. **Analysis of the Energy Transmission System Performance after the use of Linear Reactor and Saturated Reactors for Voltage**

Regulation. ICREPQ '17 - International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Malaga: [s.n.]. 2017.

15. VASCONCELLOS, A. B. D. et al. **Análise Técnica Comparativa Sobre o Emprego de Reatores Saturados e Lineares para a Regulação da Tensão em Sistemas de Transmissão Radiais**. VIII CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica. Blumenau, SC: [s.n.]. 2009.

16. MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1983.

17. SIMONI, V. R. et al. **Modeling and Analysis of Naturally Saturated Reactors in Optimal Power Flow Studies**. 2011 IEEE/PES Power System Conference and Exposition. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

18. CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de Análise de Redes V11.05.04: Manual do Usuário**. CEPEL. Rio de Janeiro. 2021.

19. LIMA, W. C. **Desenvolvimento de Metodologias de Equivalentes de Sistemas Elétricos para Aplicação em Anarede**. Trabalho de Conclusão de Curso - UFPE. Recife. 2022.