



Universidade Federal de Juiz de Fora  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Mateus Lopes Lima

**Construção de região de segurança em regime permanente para sistemas de  
distribuição de energia utilizando otimização por enxame de partículas**

Dissertação de Mestrado

Juiz de Fora

2023

Mateus Lopes Lima

Construção de região de segurança em regime permanente para sistemas de distribuição de energia utilizando otimização por enxame de partículas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica 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. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lima, Mateus Lopes.

Construção de região de segurança em regime permanente para sistemas de distribuição de energia utilizando otimização por enxame de partículas / Mateus Lopes Lima. – 2023.

140 f. : il.

Orientador: Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2023.

1. Região de Segurança em Regime Permanente. 2. Sistema de Distribuição de Energia. 3. Otimização por enxame de partículas. 4. Geração Distribuída. 5. Processamento Paralelo. Passos Filho, João Alberto, orient.  
II. Título.

**Mateus Lopes Lima**

**Construção de região de segurança em regime permanente para sistemas de distribuição de energia utilizando otimização por enxame de partículas**

Dissertação  
apresentada ao  
Programa de Pós-  
Graduação em  
Engenharia  
Elétrica 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 14 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr. João Alberto Passos Filho**- Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof. Dr. Wesley Peres**

Universidade Federal de São João Del-Rei

**Prof. Dr. Leonardo Willer de Oliveira**

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 22/11/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Joao Alberto Passos Filho, Coordenador(a)**, em 14/12/2023, às 15:27, 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 **Leonardo Willer de Oliveira, Professor(a)**, em 14/12/2023, às 15:33, 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 **Wesley Peres, Usuário Externo**, em 14/12/2023, às 16:12, 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-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1589825** e o código CRC **92027F52**.

---

*Dedico este trabalho aos meus pais Celso e Cleyde  
e ao meu irmão Filipe, por todo apoio e incentivo.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, à Deus, por me iluminar nessa jornada.

Agradeço aos meus pais, Celso e Cleyde, por todo esforço e sacrifício que passaram para me proporcionar essa oportunidade, bem como o apoio e incentivo nessa trajetória.

Ao meu irmão Filipe, por ser o meu maior motivador, além de inspiração profissional e pessoal.

Ao meu orientador João Alberto Passos Filho, por toda confiança depositada em mim, bem como pelos ensinamentos e conselhos transmitidos e que contribuíram, sem dúvida alguma, para o meu crescimento.

Aos amigos do mestrado, em especial ao amigo Ranielli Vieira pela parceria e apoio ao longo dos projetos de pesquisa e das disciplinas.

Aos amigos Thiago Ribeiro, Luis Arthur Haddad e Amanda Pávila pela amizade e conhecimentos compartilhados desde a graduação.

Ao amigo Othon Ávila por toda ajuda prestada durante a elaboração deste trabalho.

Aos demais amigos e familiares, por todo apoio e compreensão nesses últimos anos.

Finalmente, agradeço ao CNPq, à CAPES, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e à Universidade Federal de Juiz de Fora por todo o suporte durante a elaboração deste trabalho.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton



## RESUMO

Esta dissertação tem como foco principal o estudo de regiões de segurança em regime permanente (SSR) para sistemas de distribuição de energia, que consiste em avaliar os pontos de operação, no qual o sistema seja capaz de operar respeitando os limites dos equipamentos e critérios definidos para qualidade do fornecimento de energia. Inicialmente, é feita uma revisão bibliográfica destacando a evolução do método, cuja origem se dá em sistemas de transmissão, até sua recente e incipiente aplicação em sistemas de distribuição. Destaca-se a relevância da SSR para estudos associados à operação de sistemas elétricos e planejamento da expansão da rede, sendo uma ferramenta amplamente utilizada no âmbito de sistemas elétricos de potência (SEPs), mas ainda pouco utilizada e de maneira limitada em sistemas de distribuição. No entanto, com o crescimento recente dos recursos energéticos distribuídos (REDs), ferramentas que avaliem a segurança da operação tornam-se essenciais para viabilizar o processo de transição energética. Na sequência, faz-se uma revisão sobre o processo de solução do fluxo de potência para sistemas de distribuição, principal insumo utilizado na construção da SSR. Com o embasamento do fluxo de potência, detalha-se o algoritmo tradicionalmente utilizado em SEPs para construção da SSR, que consiste na solução de sucessivos fluxos de potência a partir de um determinado ponto de operação convergido, sujeito a incrementos fixos de potência, sendo implementado neste trabalho para sistemas de distribuição de energia através de uma integração com o *software* OpenDSS, utilizado como motor de cálculo para solução do fluxo de potência. Sendo a metodologia tradicional onerosa computacionalmente, propõe-se um novo método de construção da região de segurança, baseado no processo de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO), com o objetivo de reduzir o tempo de processamento da região de segurança, uma vez que utiliza um incremento de potência variável ao longo do método iterativo. Em linha com esse objetivo detalha-se como a utilização de processamento paralelo pode auxiliar nesse processo, destacando também sua implementação nos métodos descritos. Com ambas metodologias implementadas, são construídas regiões de segurança para dois sistemas de distribuição e através dos resultados obtidos, observa-se que a metodologia proposta é eficaz na construção da SSR, apresentando, em alguns casos, uma melhor qualidade na definição do contorno da região segura. Entretanto, sua aplicação se mostrou ineficiente, uma vez que o tempo de processamento foi, em geral, superior ao método tradicional, restringindo o uso desse método para casos específicos. Por fim, apresenta-se uma aplicação viabilizada pelo uso da SSR, em que se avalia como a participação da geração distribuída (GD) no controle de tensão local é capaz de ampliar a margem de segurança do sistema, otimizando a operação da rede.

Palavras-chave: Região de Segurança em Regime Permanente, Sistema de Distribuição, Otimização por Enxame de Partículas, Geração Distribuída, Processamento Paralelo.

## ABSTRACT

The main focus of this dissertation is the study of steady-state security regions (SSR) for power distribution systems. This involves evaluating the operating points at which the system is capable of operating within the limits of the equipments and the criteria defined for the quality of the power supply. Initially, a bibliographical review is carried out, highlighting the evolution of the method, which originated in transmission systems, up to its recent and incipient application in distribution systems. The relevance of SSR for studies associated with the operation of electrical systems and grid expansion planning is emphasized. This tool is widely used within the area of electrical power systems (EPS) but is unusual and limited in extent in distribution systems. However, with the recent growth of distributed energy resources (DERs), tools that assess operational security have become essential to enable the energy transition process. This is followed by a review of the power flow solution process for distribution systems, the main input used to build the SSR. With the power flow background, the algorithm traditionally used in EPS to build the SSR is detailed, consisting of solving successive power flows from a given converged operating point, subject to fixed power increments. The method is developed for power distribution systems by integrating it with OpenDSS, which is used as a calculation engine to solve the power flow. Since the traditional methodology is computationally expensive, a new method for constructing the security region is proposed, based on the particle swarm optimization (PSO) process, with the aim of reducing the processing time of construction of the security region since it uses a variable power increment throughout the iterative method. With this same objective, it is detailed how the use of parallel processing can help in the construction of the SSR and how it can be used in the aforementioned methods. With both methodologies in place, security regions are constructed for two distribution systems, and the results obtained show that the proposed methodology is effective in constructing the SSR, in some cases showing better quality in defining the shape of the safe region. However, its application proved to be inefficient, since the processing time was generally longer than the traditional method, restricting the use of this method to specific cases. Finally, an application made possible by the use of SSR is presented, in which it is evaluated how the participation of distributed generation (DG) in local voltage control is able to increase the system's safety margin, optimizing grid operation.

Key-words: Steady-state Security Region, Distribution System, Particle Swarm Optimization, Distributed Generation, Parallel Processing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução matriz energética primária mundial. . . . .	17
Figura 2 – Fornecimento total de energia por fonte e emissão de $CO_2$ por cenário. . . . .	18
Figura 3 – Matriz elétrica brasileira 2023 . . . . .	19
Figura 4 – Previsão da contribuição dos REDs no atendimento à carga. . . . .	21
Figura 5 – Região de segurança 3D. . . . .	23
Figura 6 – Representação da região de segurança em nomogramas. . . . .	23
Figura 7 – Representação da trajetória de injeção de potência e o corredor de segurança a ela associada. . . . .	27
Figura 8 – Região de segurança implícita e explícita. . . . .	30
Figura 9 – Exemplo de aplicação da região de segurança. . . . .	32
Figura 10 – Fluxograma para análise dinâmica da segurança. . . . .	34
Figura 11 – Limites da região de segurança dinâmica. . . . .	35
Figura 12 – Diferentes visualizações de SSR com gráficos nomogramas. . . . .	37
Figura 13 – Comparação SSR com e sem controle de tensão. . . . .	38
Figura 14 – Integração entre ferramentas para análise de segurança estática e dinâmica. . . . .	39
Figura 15 – Comparação região de segurança estática e dinâmica. . . . .	39
Figura 16 – Comparação distância de segurança antes e após contingências. . . . .	41
Figura 17 – SSR considerando variabilidade das fontes renováveis. . . . .	45
Figura 18 – Evolução do número de publicações sobre SSR ao longo dos anos. . . . .	47
Figura 19 – Direções de busca SSR. . . . .	53
Figura 20 – Construção SSR Etapa Inicial. . . . .	54
Figura 21 – Construção SSR Etapa 1. . . . .	54
Figura 22 – Construção SSR Etapa 2. . . . .	55
Figura 23 – Construção SSR Etapa 3. . . . .	55
Figura 24 – Construção SSR Etapa 4. . . . .	56
Figura 25 – Construção SSR Etapa 5. . . . .	56
Figura 26 – Construção SSR Etapa 6. . . . .	57
Figura 27 – Construção SSR Etapa Final. . . . .	57
Figura 28 – Fluxograma construção SSR. . . . .	59
Figura 29 – Diferença entre SSR para transmissão e distribuição. . . . .	65
Figura 30 – Fluxograma metodologia tradicional. . . . .	66
Figura 31 – Fluxograma metodologia tradicional avaliando todos limites. . . . .	69
Figura 32 – Influência da característica social no PSO. . . . .	71
Figura 33 – Fluxograma metodologia PSO. . . . .	72
Figura 34 – Inicialização das partículas do PSO. . . . .	73
Figura 35 – Inicialização velocidade da partícula. . . . .	74
Figura 36 – Fluxograma da metodologia tradicional aplicando MPI . . . . .	77
Figura 37 – Sistema IEEE 13 Barras modificado. . . . .	80

Figura 38 – Região de segurança completa para o sistema IEEE 13 Barras utilizando método tradicional. . . . .	82
Figura 39 – Variação da região de segurança com o número de direções na metodologia tradicional para o sistema IEEE13. . . . .	83
Figura 40 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema IEEE 13 barras utilizando processamento paralelo e metodologia tradicional. . . . .	85
Figura 41 – Região de segurança completa para o sistema IEEE 13 Barras utilizando método PSO. . . . .	87
Figura 42 – Variação qualitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema IEEE 13 Barras. . . . .	88
Figura 43 – Variação quantitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema IEEE 13 Barras. . . . .	89
Figura 44 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema IEEE 13 barras utilizando processamento paralelo e metodologia PSO. . . . .	91
Figura 45 – Região de segurança completa para o sistema IEEE 13 Barras utilizando método tradicional sem controle de tensão. . . . .	92
Figura 46 – Impacto do controle de tensão na região de segurança do sistema IEEE 13 Barras. . . . .	93
Figura 47 – Sistema de distribuição CKT5. . . . .	95
Figura 48 – Região de segurança completa para o sistema CKT5 Barras utilizando método tradicional. . . . .	97
Figura 49 – Variação da região de segurança sistema CKT5 com o número de direções na metodologia tradicional. . . . .	98
Figura 50 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema CKT5 utilizando processamento paralelo e metodologia tradicional. . . . .	100
Figura 51 – Região de segurança completa para o sistema CKT5 Barras utilizando método PSO. . . . .	101
Figura 52 – Variação qualitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema CKT5. . . . .	102
Figura 53 – Variação quantitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema CKT5. . . . .	103
Figura 54 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema CKT5 utilizando processamento paralelo e metodologia PSO. . . . .	105
Figura 55 – Diferença entre contorno da região segura entre os métodos PSO e Tradicional para o sistema IEEE 13 Barras. . . . .	107
Figura 56 – Diferença entre contorno da região segura entre os métodos PSO e Tradicional para o sistema CKT5. . . . .	108
Figura 57 – Representação de um elemento conectado no sistema. . . . .	121

Figura 58 – Esquemático para representação dos elementos da matriz de admitância nodal. . . . .	122
Figura 59 – Representação de um elemento genérico entre duas barras. . . . .	124
Figura 60 – Exemplo de uma carga não linear conectada à rede. . . . .	126
Figura 61 – Equivalente de Norton para uma carga não linear conectado à rede. . .	127
Figura 62 – Fluxograma de etapas do fluxo de potência. . . . .	129
Figura 63 – Circuito Tutorial 4 Barras. . . . .	129
Figura 64 – Circuito Tutorial 4 Barras Representado no OpenDSS. . . . .	130
Figura 65 – Sentido das Correntes na Barra de Carga. . . . .	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de solução para <i>online</i> DSA. . . . .	33
Tabela 2 – Revisão da literatura sobre SSR. . . . .	48
Tabela 3 – Cenários de intercâmbio entre grupos geradores. . . . .	60
Tabela 4 – Distribuição REDs no sistema IEEE 13 barras. . . . .	80
Tabela 5 – Fluxos resolvidos para sistema IEEE 13 Barras com metodologia tradicional. . . . .	84
Tabela 6 – Fluxos resolvidos para sistema IEEE 13 Barras com metodologia PSO. . . . .	90
Tabela 7 – Fluxos resolvidos para sistema CKT5 com metodologia tradicional. . . . .	99
Tabela 8 – Fluxos resolvidos para sistema CKT5 com metodologia PSO. . . . .	104
Tabela 9 – Comparação metodologia tradicional e PSO sistema IEEE 13 Barras. . . . .	109
Tabela 10 – Comparação metodologia tradicional e PSO sistema CKT5. . . . .	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AP	Autoprodução não-injetada na rede
APS	<i>Announced Pledges Scenario</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COP	Conferência das Partes ( <i>Conference of the Parties</i> )
DSA	Avaliação dinâmica da segurança ( <i>Dynamic Security Assessment</i> )
EE	Eficiência Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FOB	Função Objetivo
GD	Geração distribuída
GEE	Gases de efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
IEA	Agência Internacional de Energia ( <i>International Energy Agency</i> )
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OLTC	Comutação Automática de Tape ( <i>On-load tap changer</i> )
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)
PSO	Otimização por Enxame de Partículas ( <i>Particle Swarming Optimization</i> )
RED	Recursos Energéticos Distribuídos
RNA	Redes Neurais Artificiais
SEP	Sistemas Elétricos de Potência

SIN	Sistema Interligado Nacional
SSR	Região de Segurança em Regime Permanente ( <i>Steady-state Security Region</i> )
STEPS	<i>Stated Policies Scenario</i>
SVSR	Região de Segurança de Tensão em Regime Permanente ( <i>Steady-state Voltage Security Region</i> )
THSR	Região de Segurança Térmica ( <i>Thermal Security Region</i> )
UCs	Unidades Consumidoras
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>17</b>
1.1	Motivação e Objetivos . . . . .	23
1.2	Publicações decorrentes deste trabalho . . . . .	24
1.3	Estrutura da dissertação . . . . .	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>26</b>
2.1	Região de segurança em sistemas de transmissão . . . . .	26
2.2	Região de segurança em sistemas de distribuição . . . . .	39
2.3	Estudos recentes sobre região de segurança . . . . .	44
2.4	Considerações parciais . . . . .	46
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>50</b>
3.1	Método iterativo para construção da região de segurança . . . . .	50
3.1.1	Divisão dos grupos geradores . . . . .	51
3.1.2	Definição dos limites de segurança e das direções de busca . . . . .	51
3.1.3	Definição das regiões exportadora e importadora . . . . .	58
3.1.4	Definição dos fatores de participação . . . . .	58
3.2	Otimização por enxame de partículas . . . . .	60
3.3	Considerações parciais . . . . .	62
<b>4</b>	<b>METODOLOGIAS PROPOSTAS . . . . .</b>	<b>63</b>
4.1	Diferença entre SSR para transmissão e para distribuição . . . . .	63
4.2	Metodologia tradicional . . . . .	65
4.3	Metodologia PSO . . . . .	70
4.4	Processamento paralelo . . . . .	76
4.5	Considerações parciais . . . . .	78
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>79</b>
5.1	Sistema de distribuição IEEE 13 Barras . . . . .	79
5.1.1	Descrição sistema . . . . .	79
5.1.2	Metodologia Tradicional . . . . .	81
5.1.2.1	Processamento Paralelo . . . . .	84
5.1.3	Metodologia PSO . . . . .	85
5.1.3.1	Processamento Paralelo . . . . .	90
5.1.4	Controle de tensão . . . . .	91
5.2	Sistema de distribuição CKT5 . . . . .	94
5.2.1	Descrição sistema . . . . .	94

5.2.2	Metodologia Tradicional . . . . .	96
5.2.2.1	Processamento Paralelo . . . . .	99
5.2.3	Metodologia PSO . . . . .	99
5.2.3.1	Processamento Paralelo . . . . .	104
5.3	Comparação dos métodos . . . . .	105
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>111</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	112

**REFERÊNCIAS . . . . . 113**

**APÊNDICE A – Fluxo de potência em sistemas de distribuição 120**

A.1	Montagem da matriz de Admitância Nodal . . . . .	121
A.2	Corrente de compensação . . . . .	126
A.3	Método ponto fixo iterativo . . . . .	127
A.4	Exemplo numérico . . . . .	128

**APÊNDICE B – Exemplo Tutorial OpenDSS . . . . . 140**

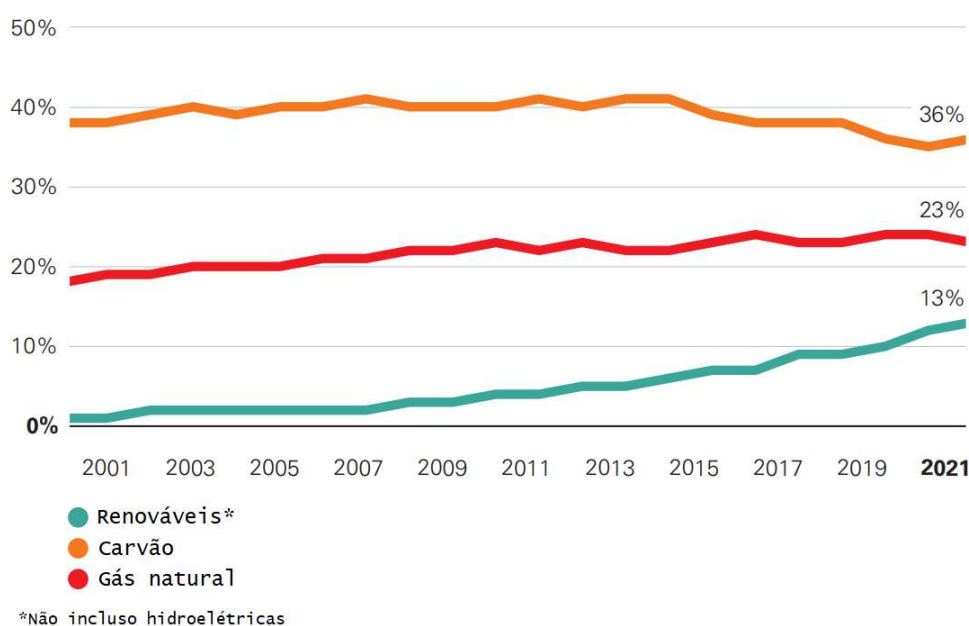
## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a preocupação com as mudanças climáticas têm reforçado a necessidade de iniciativas relevantes para minimizar os impactos da ação antrópica frente ao aquecimento global. Estudos apresentados após a vigésima sétima Conferência das Partes (COP 27) [1] realizada em novembro de 2022, sinalizam que a elevação de 1,5°C na temperatura média global (patamar crítico definido no Acordo de Paris [2] e no Pacto de Glasgow [3]) pode ser atingida ainda nos próximos 5 anos, o que implicaria uma frequência cada vez maior de eventos climáticos extremos, a exemplo de incêndios florestais, elevação do nível do mar e alteração no regime de inundações e secas [4].

Nesse contexto, o processo de descarbonização, que diz respeito a uma política de mínima produção de gases de efeito estufa (GEE) na biosfera e baixas emissões de carbono, é visto como fundamental para se atingir as metas definidas no Pacto de Glasgow (até a metade do século atual, zerar as emissões de dióxido de carbono, bem como reduzir significativamente a emissão de outros GEE). Essa descarbonização pode ser tratada sobre diferentes áreas, como os setores energéticos, econômico, ambiental e tecnológico [5].

No que se refere ao setor energético, as ações para descarbonização estão associadas ao processo de transição energética, que se caracteriza por mudanças significativas na estrutura da matriz energética primária mundial, visando a substituição de fontes de energia poluentes como carvão e combustíveis fósseis, por fontes de energia renováveis, bem como à transformação da frota de automóveis para veículos movidos a energia elétrica [6, 7].

Figura 1 – Evolução matriz energética primária mundial.

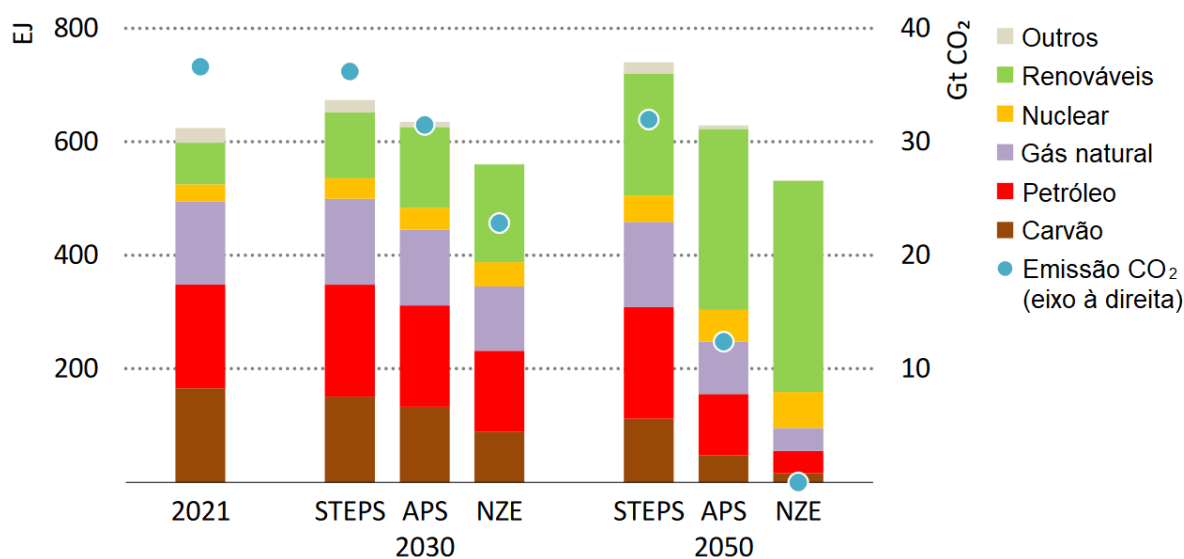


Fonte: Adaptado de [8]

Quando se analisa a evolução matriz energética primária mundial (Figura 1) é possível observar um crescimento significativo das novas fontes renováveis, especial eólica e solar (não incluindo aqui o impacto das hidroelétricas), atingindo um percentual de 13% da matriz mundial, impulsionado fortemente pela expansão da geração eólica e solar. Entretanto, a participação do carvão ainda se mantém elevada, cerca de 36% em 2021, tendo uma sutil elevação nos últimos anos com a retomada do crescimento econômico pós COVID-19. Soma-se a isso, a redução da oferta e escalada do preço do gás natural na Europa em função da guerra na Ucrânia, tendo em vista que a Rússia era responsável pelo suprimento de aproximadamente 40% do gás natural e GLP da Europa [8].

O crescimento das fontes renováveis se mantém quando analisado a expectativa de evolução da matriz elétrica mundial para as próximas décadas. As projeções feitas pela Agência Internacional de Energia (IEA) consideram três cenários distintos para evolução da matriz energética: o primeiro deles considera que apenas as políticas públicas atualmente em vigor em relação à questão climática serão aplicadas, sendo denominado cenário STEPS (do inglês, *Stated Policies Scenario*); o segundo, um pouco mais otimista, assume que todas as metas definidas pelas políticas públicas atuais serão plenamente atingidas e dentro do prazo definido, sendo referido como APS (do inglês, *Announced Pledges Scenario*); por fim, o terceiro cenário vislumbra o cumprimento da meta definida no Pacto de Glasgow de zerar as emissões de dióxido de carbono até 2050 e conter o aumento da temperatura global ao limite de 1,5 °C, nomeado como cenário NZE (do inglês, *Net Zero Emissions*) [9]. Na Figura 2 é possível observar que, para os três cenários, o crescimento das fontes renováveis é, notadamente, o mais expressivo.

Figura 2 – Fornecimento total de energia por fonte e emissão de  $CO_2$  por cenário.



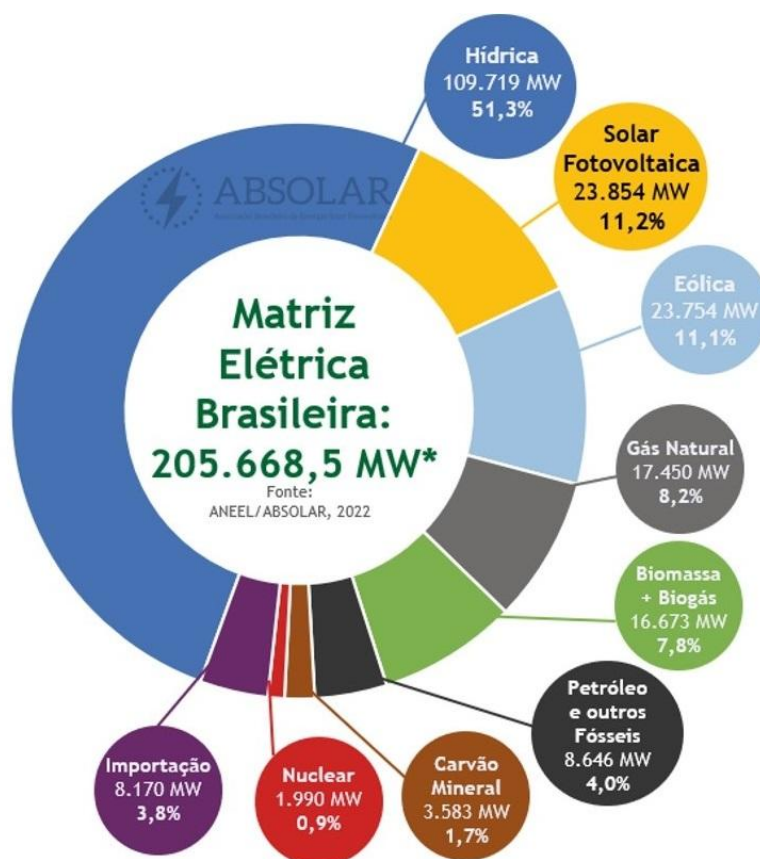
Fonte: Adaptado de [9]

Até 2030, mesmo no cenário mais conservador para o crescimento das renováveis, sua

participação salta de 28%, em 2021, para 43% em 2030, sendo que 90% deste crescimento está associado a expansão das eólicas e solares. Já no cenário APS, essa participação chega a ser próxima de 50% ainda em 2030. Nos cenários APS e NZE o crescimento das fontes renováveis é acompanhado por uma redução no uso dos combustíveis fósseis. Quando se avalia as previsões para 2050, nota-se que os cenários com menores emissões de dióxido de carbono são caracterizados pela participação cada vez maior de fontes renováveis e, paralelamente, uma redução significativa no uso de petróleo e seus derivados quando comparado aos patamares atuais [9].

No Brasil, destaca-se a elevada participação das fontes renováveis na matriz energética, que segundo dados do BEN 2022 representavam cerca de 48,4% [10], muito acima da média global de 15% [9]. Quando se analisa a matriz elétrica brasileira (Figura 3) do início do ano de 2023, a participação das fontes renováveis supera 80%.

Figura 3 – Matriz elétrica brasileira 2023



Fonte: Adaptado de [11].

Vale destacar que em janeiro de 2023, a fonte solar ultrapassou a eólica em potência instalada, passando a ser a segunda maior fonte de eletricidade no país, sendo reflexo, dentre outros fatores, de uma política de incentivo fiscal adotada em 2012 regulamentado pela REN 482, reajustada somente em 2023 com a definição do Marco Legal da Geração Distribuída (lei 14.300) [12]. Resumidamente, o benefício concedia isenção de pagamento de certas

componentes associadas à remuneração das distribuidoras para os ativos que detivessem geração distribuída, o que tornava o investimento atrativo frente ao cenário de elevado custo da tarifa de energia e popularização da tecnologia de GD, o que, conseqüentemente, levou a uma disparada no crescimento das fontes renováveis, principalmente de geração solar [13].

Diante das alterações na forma de compensação da GD discutidas na lei 14.300 [12], crescem as discussões a respeito do uso de sistemas de armazenamento de energia por baterias juntamente às instalações de geração, com o intuito de armazenar o excedente de geração e aumentar o autoconsumo da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD). Dentre outras vantagens no uso das baterias, cita-se a capacidade de deslocamento do consumo no horário de ponta para os consumidores em modalidade tarifária horária, venda de créditos de carbono com a substituição do uso de geradores a diesel, e atuação como *backup* em períodos de indisponibilidade da rede de distribuição. Entretanto, os custos com este tipo de tecnologia ainda são elevados e mesmo com a perspectiva de redução deste valor nos próximos anos, o investimento ainda não é atrativo [13].

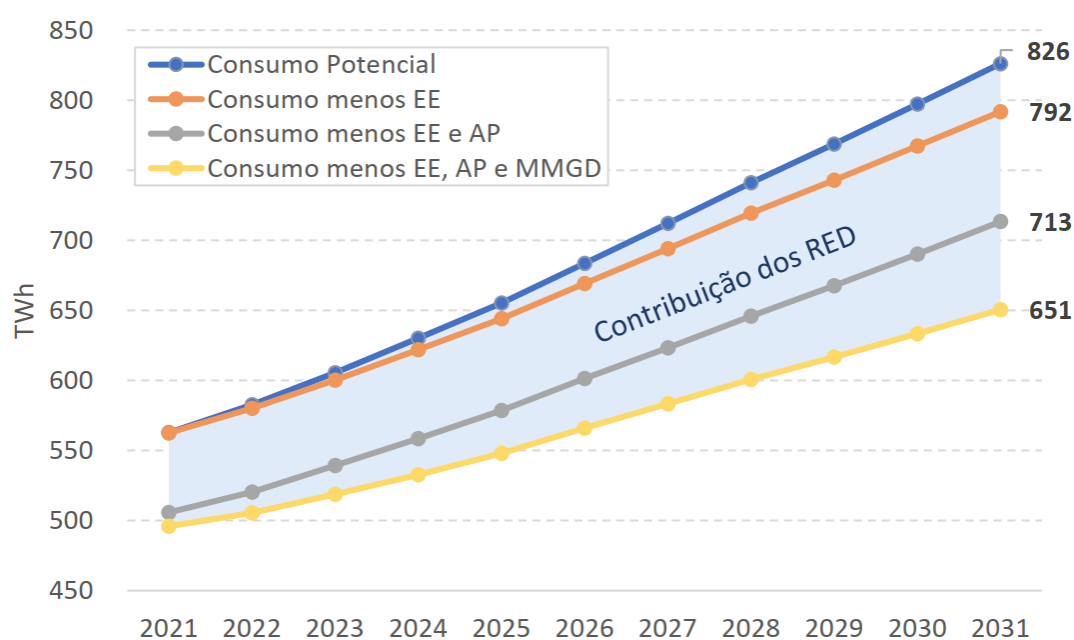
Ainda em linha ao processo de descarbonização do setor energético, a perspectiva de crescimento no uso de veículos elétricos em substituição a frota de veículos a combustão, favorece significativamente a redução das emissões de GEE, tendo em vista que o setor de transporte é um dos mais dependentes dos combustíveis fósseis. Na referência [14], estima-se que o uso de veículos elétricos a bateria pode contribuir com até 90% de redução na emissão dos GEE se comparado a um veículo tradicional. O nível de emissão de GEE, entretanto, não chega a ser nulo devido ao processo de fabricação das baterias. Apesar dos elevados custo e tempo de carregamento da tecnologia atual, fatores que tendem a ser superados com o avanço da tecnologia, a adoção de políticas de incentivo ao uso de veículos elétricos, como subsídio nos preços e acessibilidade de pontos de carregamento, podem acelerar esse processo de transição energética.

Todos os itens mencionados anteriormente como importantes no processo de transição energética, podem ser categorizados como Recursos Energéticos Distribuídos (RED), o que diz respeito a tecnologias de geração, armazenamento de energia elétrica e redução do consumo, localizados dentro dos limites da área de uma determinada concessionária de distribuição e, normalmente, próximo às unidades consumidoras (UC)[13]. A aplicação desses recursos, além de contribuir no processo de transição energética, traz outros benefícios como aumento da confiabilidade da rede, redução das perdas na rede elétrica, uma vez que os pontos de geração localizam-se próximos às cargas, e até mesmo prestação de serviços ancilares, como, por exemplo, o suporte de tensão fornecido pelas redes de distribuição ativa, entre outros [15].

Exemplificando os impactos positivos dos REDs no cenário nacional, a Figura 4 estima a participação dos REDs no atendimento ao consumo de energia no país até o ano

de 2031. A linha azul representa a estimativa de consumo de energia, em  $TWh$ , em cada ano no Brasil. A linha em laranja, esse mesmo consumo, mas considerando a adoção de medidas de eficiência energética (EE) junto às unidades consumidoras. Em cinza tem-se a redução do consumo considerando além do EE o atendimento de parte do consumo pela autoprodução não-injetada na rede (AP). E, por fim, em amarelo, a consideração dos demais fatores e incluindo também a participação da MMGD. Nesse cenário, em 2031, a soma da participação de todas as formas dos REDs representaria cerca de 21% de consumo de eletricidade, equivalente a 175  $TWh$ .

Figura 4 – Previsão da contribuição dos REDs no atendimento à carga.



Fonte: Extraído de [13].

Entretanto, apesar dos benefícios gerados pelos REDs, sua aplicação em redes de distribuição resulta em maior complexidade à operação da distribuição. Nesse cenário, a concepção de uma rede de distribuição tradicional, construída sob a perspectiva de uma geração centralizada e fluxo unidirecional de energia da subestação em direção às unidades consumidoras, cede espaço a uma rede com geração descentralizada com fluxo bidirecional de potência, em que a energia também pode fluir da unidade consumidora em direção à subestação. Isso implica em reavaliar a estrutura das redes já existentes e readequá-las à essa nova configuração, a fim de se garantir a segurança da operação.

Dentre os desafios gerados pela inserção dos REDs é possível mencionar o ajuste da proteção, tendo em vista que, com a inserção dos REDs, o fluxo bidirecional de potência pode provocar uma atuação indevida do equipamento, ou mesmo afetar os tempos de resposta do equipamento, prejudicando sua coordenação e seletividade [16, 17]; a regulação de tensão na rede, tendo em vista que o excesso de geração por parte GD pode ocasionar

problemas de sobretensão, ao passo que a inserção de veículos elétricos pode agravar ainda mais os períodos de subtensão na rede; saturação dos transformadores de distribuição que não foram dimensionados para operar com tal carregamento [18, 19]; problemas com a sobrecarga de transformadores e das linhas diante de um fluxo reverso em períodos de alta geração de GD em carga leve [20].

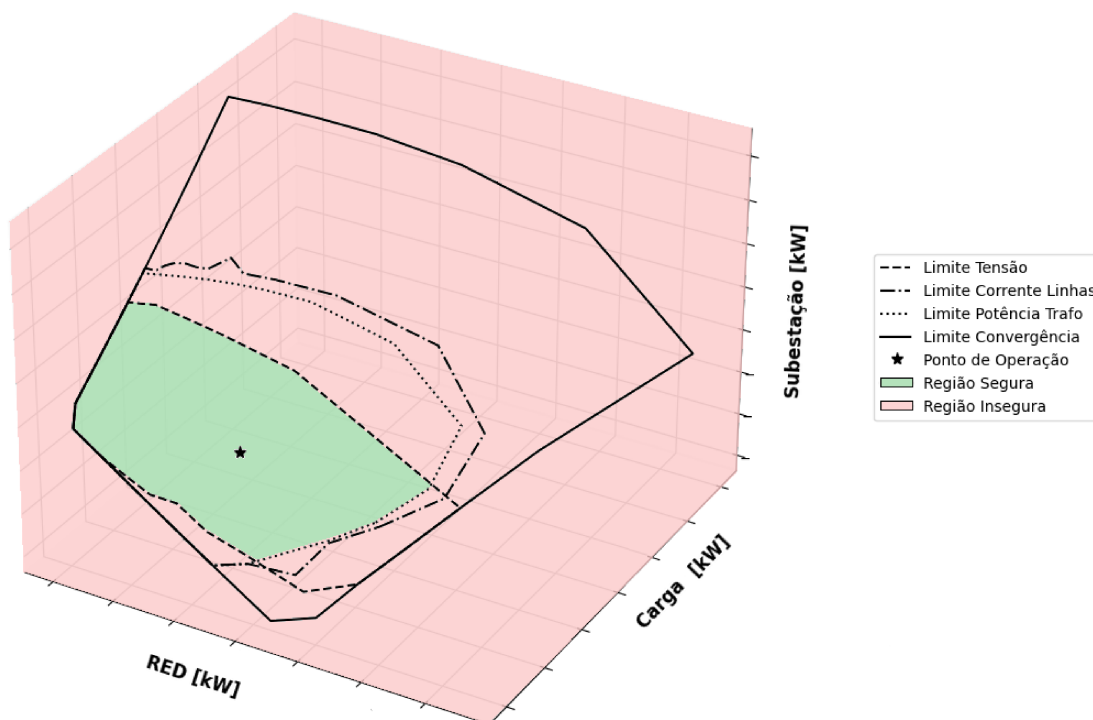
Todos esses aspectos colocam em risco a segurança da operação do sistema, revelando a necessidade por uma ferramenta que seja capaz de avaliar a segurança de cada ponto operativo da rede sob diferentes cenários de carga, geração e intercâmbio, a fim de orientar análises como a capacidade máxima de hospedagem de GD em uma rede, indicar as ações por parte da operação para se garantir uma boa margem de segurança e, em última instância, auxiliar no planejamento da distribuição, indicando as regiões mais sensíveis a problemas e portanto prioritárias no reforço e expansão da rede.

Com esse propósito, o estudo da região de segurança em regime permanente (do inglês, *steady-state security region SSR*) avalia a margem de segurança da rede mediante a máxima variação de potência das cargas e das fontes de geração inseridas no sistema sem que nenhum limite operativo seja violado. Dentre esses limites, pode-se mencionar o nível de tensão de cada uma das barras do sistema, o limite de intercâmbio entre as regiões desse sistema considerando um cenário de contingência de determinados equipamentos, os limites de potência dos transformadores e corrente máxima das linhas, que se tratando de sistemas trifásicos e desequilibrados, devem ser analisado por fase. A partir de um universo de diferentes pontos de operação, que representam diferentes cenários de geração e carga, é possível delimitar uma região segura, dentro da qual todos os pontos de operação respeitam os referidos limites e que, portanto, são condições seguras de operação, e o centro desta região seria o ponto com a maior margem de segurança. Enquanto que todos os pontos fora dessa região, são considerados pontos inseguros, e representam a região na qual ao menos um dos limites anteriormente descritos são violados.

A Figura 5 exemplifica uma região de segurança. A partir de um ponto de operação conhecido, observa-se a máxima variação de potências dos REDs e das cargas conectadas neste sistema (e por consequência a potência que flui pela subestação) em que os limites operativos da rede são respeitados, definindo assim a região segura de operação colorida na cor verde. Já a região destacada em vermelho compreende o conjunto de pontos de operação inseguros. Essa região tridimensional, também pode ser apresentada em um conjunto de projeções bidimensionais, através do agrupamento dois a dois dos eixos cartesianos, conforme exibido na Figura 6.

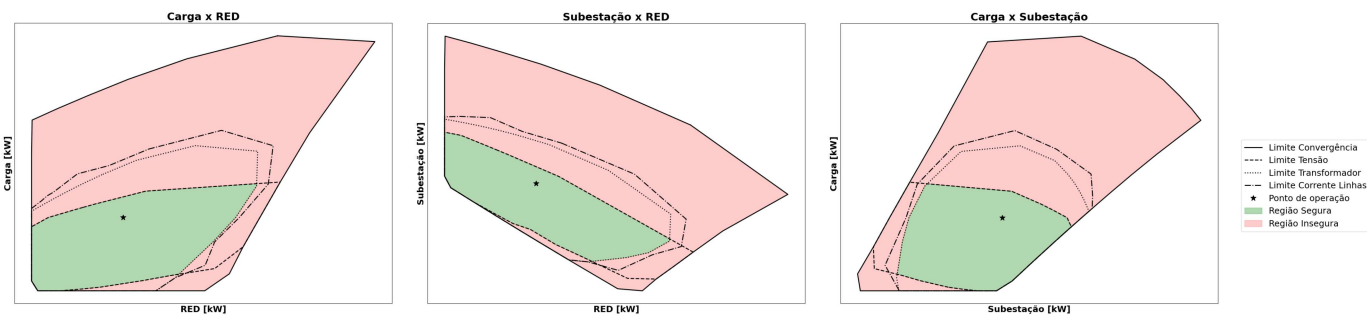


Figura 5 – Região de segurança 3D.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 6 – Representação da região de segurança em nomogramas.



(a) Carga x RED.

(b) Subestação x RED.

(c) Carga x Subestação

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 1.1 Motivação e Objetivos

Tendo em vista a acentuada transição de um modelo de rede tradicional com geração centralizada, por um novo modelo caracterizado por geração distribuída, fluxo bidirecional e com grande participação dos REDs, fazem-se necessárias ferramentas que auxiliem a adequação dos sistemas de distribuição à esse novo cenário. Neste contexto, é possível se valer de um conceito já difundido em sistemas de transmissão no que se refere à margem de segurança da rede, e aplicá-lo às redes de distribuição, auxiliando no processo

de readequação de redes já existentes.

Uma vez consolidada essa análise, torna-se possível avaliar os principais problemas de desempenho elétrico que os sistemas de distribuição enfrentarão com a entrada dos REDs, sob diferentes cenários de carga e geração, e com isso, orientar as ações a serem executadas a fim de garantir a maior margem de segurança possível, ou até mesmo de transferir um ponto de operação inseguro para o interior da região segura. Além disso, tal análise pode ser aplicada para estudos associados à expansão e investimentos na rede, a exemplo da máxima capacidade de hospedagem de GD no sistema.

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho incluem a formulação de um método para construção da região de segurança em sistemas de distribuição, valendo-se da representação completa da rede ao se utilizar a formulação trifásica para solução do fluxo de potência, garantindo robustez aos resultados encontrados. Desse modo, a metodologia aplicada neste trabalho visa, além de consolidar diferentes contribuições da literatura em uma região de segurança única, ampliar as aplicações dessa ferramenta em sistemas de distribuição, informando não somente o limite de segurança de um determinado ponto de operação, mas também quais os fatores que limitam a operação segura, ou seja, a ordem de prioridade em que cada limite operativo seria atingido. Sendo esta, uma das principais contribuições e inovações deste trabalho. Cita-se também como contribuição deste trabalho a análise de como o controle de tensão, por parte da GD, é capaz de alterar a região segura de operação.

Além disso, tratando-se de um estudo que requer a execução de um elevado número de fluxos de potência e, por conta disso, com elevado custo computacional, outro objetivo deste trabalho é avaliar se a aplicação de uma técnica de otimização inspirada em meta-heurística, em particular a técnica de otimização por enxame de partículas (do inglês, *particle swarming optimization PSO*), é capaz de proporcionar maior agilidade ao processo de construção da região de segurança. Sendo esta, outra inovação deste trabalho, ao adaptar o problema de construção da SSR para sistemas de distribuição em um problema de otimização e comparar os resultados de ambas metodologias propostas neste trabalho.

Por fim, também com o objetivo de conferir maior agilidade aos métodos propostos, outra contribuição deste trabalho consiste na aplicação de processamento paralelo, a fim de executar atividades independentes de forma simultânea e, com isso, reduzir o tempo total de construção da SSR.

## 1.2 Publicações decorrentes deste trabalho

O seguinte artigo foi publicado em decorrência deste trabalho:

- Lima, M. L.; Pombo R. V.; Passos Filho, J. A.; Ávila, O. F. *Impact of ancillary services in the steady-state security region in distribution systems*,

*2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, Curicó, Chile, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICA-ACCA56767.2022.10005976.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação é formada ao todo por seis capítulos e dois apêndices, na qual o Capítulo 1 contextualiza o trabalho mediante as recentes modificações no setor elétrico, ambiental e político, destacando a aplicação e os objetivos deste trabalho. No Capítulo 2, é feita uma revisão na literatura sobre o método de região de segurança, destacando a evolução dos modelos de SSR, partindo das aplicações em sistemas de transmissão até as aplicações atuais nos sistemas de distribuição. No Capítulo 3, destaca-se como os modelos atuais realizam a construção da SSR. Ainda neste capítulo, é feita uma revisão sobre o método de otimização por enxame de partículas. No Capítulo 4, apresenta-se as duas metodologias propostas por este trabalho para construção da SSR em sistemas de distribuição. A primeira metodologia utiliza o mesmo processo de incremento do potência do métodos utilizados em sistemas de transmissão, porém adaptando-o para o nível de distribuição. Por esta razão, tal metodologia é descrita neste trabalho como metodologia tradicional. Nela, realiza-se um incremento fixo de potência e reduz-se esse valor à medida que os limites de segurança são encontrados. Já a segunda metodologia se baseia em uma estratégia de otimização por enxame de partículas para definir o passo de potência a cada iteração do método, sendo denominada metodologia PSO. Também neste capítulo destaca-se como o processamento paralelo é capaz de agilizar a construção da SSR. Na sequência, no Capítulo 5 apresenta-se os resultados obtidos durante a construção da SSR para as duas metodologias descritas e para dois sistemas de distribuição, comparando-se a qualidade das regiões formadas e o custo computacional de cada um dos métodos e destacando também a aplicação dessa ferramenta no que se refere à variação da margem de segurança diante da capacidade de regulação de tensão pela GD. No Capítulo 6 chega-se nas conclusões obtidas sobre as metodologias propostas, as aplicações desse estudo e possibilidades de trabalhos futuros. Ao final do trabalho, no Apêndice A é feita uma revisão sobre o fluxo de potência em sistema de distribuição, principal insumo para a construção da SSR, e que fundamenta o conteúdo apresentado no Capítulo 3, detalhando o processo de cálculo utilizando pelo *software* que resolve o fluxo de potência e trazendo um exemplo numérico. Por fim, no apêndice B, são apresentados os dados do sistema tutorial utilizado no exemplo descrito no Apêndice A. Destaca-se que todos os modelos de rede utilizados no trabalho já estão modelados no próprio *software* OpenDSS, sendo dados públicos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado um histórico dos trabalhos encontrados na literatura envolvendo a construção da região de segurança e suas aplicações em diferentes áreas da engenharia elétrica, a exemplo da operação e planejamento do sistema. Inicialmente serão destacados os trabalhos voltados para os sistemas de transmissão, onde o método foi inicialmente desenvolvido, e na sequência sua aplicação para sistemas de distribuição.

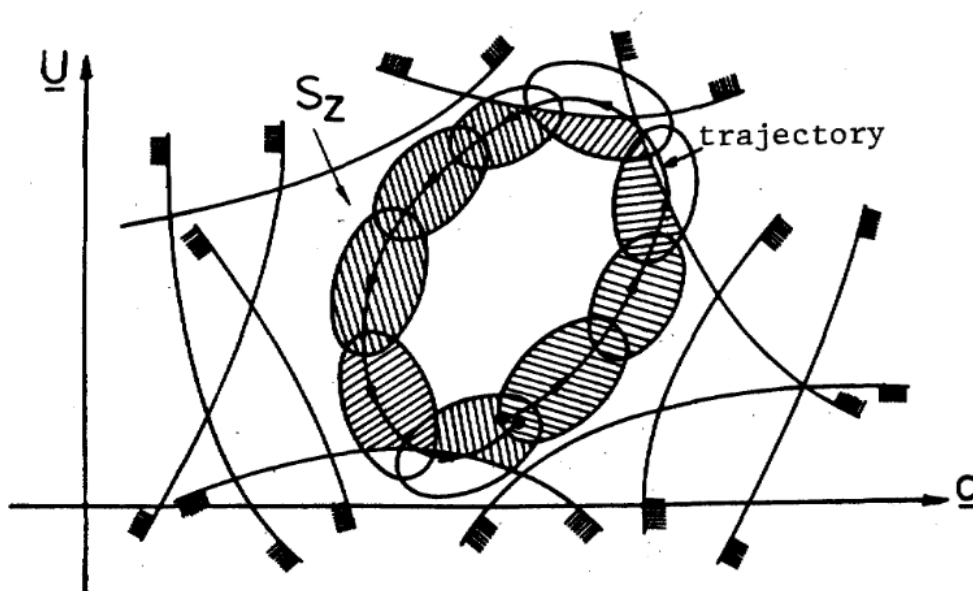
### 2.1 Região de segurança em sistemas de transmissão

Uma das primeiras menções ao tema de região de segurança para sistemas elétricos é feita em meados da década de 1970 [21], focado em sistemas de transmissão de energia. Vale destacar que a análise da segurança envolve a resolução de sucessivos fluxos de potência, que consiste na solução de sistemas de equações algébricas não-lineares e requer a execução de métodos numéricos ao invés de métodos analíticos [22]. Esses métodos numéricos por sua vez, exigiam um alto esforço computacional considerando a capacidade processamento deste período, de modo que os primeiros estudos da SSR se utilizavam do fluxo de potência linearizado para análise da região de segurança, o que reduzia significativamente o esforço de processamento de dados e apresentava precisão aceitável, a depender da característica do sistema, principalmente da abertura angular das barras desse sistema, de modo que para sistemas com carga pesada essa precisão tende a reduzir [23, 24].

No início da década de 1980, outro método para construção da região de segurança foi proposto em [25]. Este método, diferente da metodologia anterior se caracterizava por um menor esforço computacional ao reduzir o número das inequações que definem a região segura. Baseado na ideia de que as injeções de potência ao longo do dia seguem uma determinada trajetória, e que as variações nas cargas e geração podem ser assumidas como regiões próximas a essa trajetória, propõe-se a definição de regiões elípticas em que cada ponto configura uma determinada configuração de geração e carga na rede, e que o centro dessa região esteja sobre a trajetória inicialmente definida do sistema. Uma representação dessa metodologia é indicada na Figura 7, sendo o eixo das abscissas associado as variações de potência das cargas, e o eixo das ordenadas associado as injeções de potência na rede, sendo  $S_Z$  o espaço que reúne todos os pontos operativos em que as restrições do problema são atendidas. Ao assumir essa premissa, o número de restrições ativas se reduzem, reduzindo assim o espaço o que torna a resolução do problema menos custosa computacionalmente, permitindo avaliar na região no entorno deste elipsoide quais os pontos seguros. Por fim, a união dos pontos seguros dos consecutivos elipsoides dá origem ao que o autor denomina, corredor de segurança, que pode ser entendido como análogo à região de segurança, sendo uma região que reúne os pontos operativos seguros do sistema. No entanto, como destacado no artigo, apesar de uma boa aproximação da

região de segurança, o modelo proposto não substitui a formulação do fluxo de potência baseado em sistemas de equações não lineares.

Figura 7 – Representação da trajetória de injeção de potência e o corredor de segurança a ela associada.



Fonte: Extraído de [25]

Ainda década de 1980, no ano 1982, na referência [26] avalia-se a variação máxima que um grupo de cargas em diferentes subestações podem apresentar sem que as linhas de transmissão e os transformadores fiquem sobrecarregados. Neste caso, além do modelo linearizado do fluxo de potência, o autor utilizou o modelo de transportes. Os resultados apresentados por ambos modelos coincidiam quando sob o ponto de vista de redes radiais, e diferenciavam a medida que aumentava-se o número de malhas na rede. Por fim, destaca-se que a aplicação deste modelo poderia auxiliar no planejamento de expansão do sistema de geração, sob o ponto de vista dos requisitos elétricos da rede.

Também no ano de 1982, em [27] é apresentado o estudo da SSR considerando tanto a potência ativa quanto reativa do sistema, deixando, portanto, de utilizar o modelo linearizado e aplicando métodos numéricos para resolução do fluxo de potência. Neste artigo, define-se o conceito de restrições de segurança, sendo o conjunto de restrições que devem ser respeitadas para que a solução do fluxo de potência possa ser classificada como um ponto de operação seguro. Sendo elas, o limite de tensão nas barras do sistema, onde todas as barras devem estar situadas entre uma tensão máxima e mínima; limite de corrente que flui pelas linhas e transformadores, sendo esta limitação associada a capacidade térmica dos equipamentos e, portanto, devendo permanecer abaixo de um valor máximo; e por fim, os limites de potência ativa e reativa das barras de geração. O modelo do fluxo de potência utilizado neste caso é o modelo desacoplado, que recebe esse nome por desprezar a relação entre a potência ativa e o nível de tensão das barras, bem como a relação entre a potência

reativa e a abertura angular das barras, o que torna o método significativamente menos custoso computacionalmente se comparado a outros métodos como o de Newton-Raphson. Porém, diferentemente do fluxo de potência linearizado, contém informações referentes a potência reativa do sistema. Por fim, partindo de premissas aceitáveis para sistemas de transmissão, o modelo proposto define os limites de potência ativa e reativa que uma barra de carga de um sistema tutorial poderia apresentar de tal forma que dentro daquela faixa de potência o fluxo de potência teria uma solução que respeitaria as restrições de segurança.

Em 1985, [28] aprofunda o estudo da SSR no que se refere a estabilidade de tensão, detalhando o papel dos transformadores com comutação automática de tape (do inglês, *On-load tap changer OLTC*) na construção da chamada região de estabilidade de tensão em regime permanente (do inglês, *steady-state voltage stability regions SSVSR*), tendo como objetivo facilitar a identificação de pontos de operações que se encontram próximos de uma região instável e com isso, prevenir o colapso de tensão do sistema, sendo portanto uma ferramenta de auxílio para o operador do sistema. Novamente, utiliza-se o modelo desacoplado para relacionar a potência reativa com a tensão das barras do sistema, modelo ao qual se insere as equações linearizadas que representam o efeito dos tapes dos transformadores OLTC. Através de manipulações matemáticas, o artigo define as condições necessárias para sistemas com reguladores de tensão atingirem a estabilidade de tensão, sendo uma ferramenta importante no monitoramento das redes em tempo real, identificando pontos de operações instáveis e alertando a necessidade de ações por parte do operador da rede.

Partindo das premissas definidas em [27], na publicação [29], de 1986, propõe uma variação do método utilizado, elaborando um modelo para maximizar a área da região de segurança elaborada inicialmente pela análise dos limites operacionais e restrições do fluxo de potência. Combinando a eficiência computacional do modelo linearizado com o modelo de otimização para incremento da região construída, o artigo destaca a precisão e agilidade do modelo, obtendo resultados precisos quando avaliado em sistemas testes, representando uma melhora na precisão das regiões modelos até então elaborados.

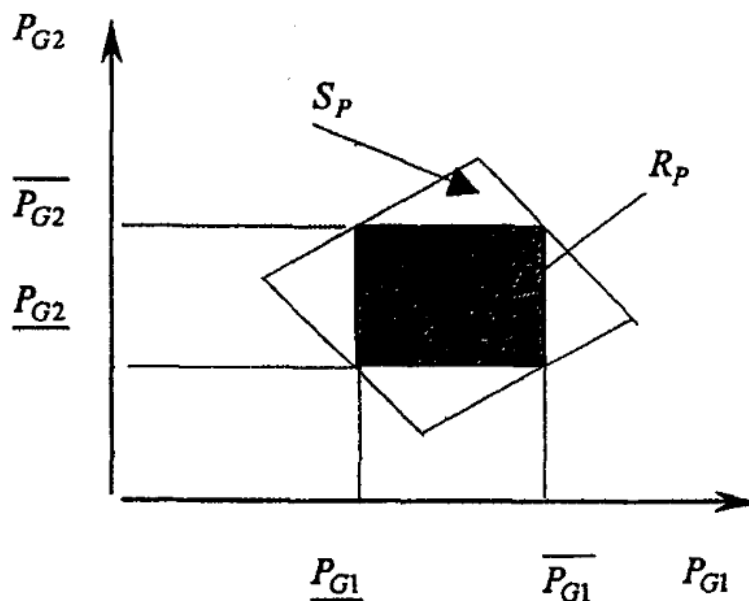
Em 1988, [30] realiza a análise de segurança, porém sob o ponto de vista dinâmico, relacionando a resposta dinâmica do sistema sujeito a pequenas perturbações com o colapso da rede, evento que se espera evitar. Sob esta ótica, apresenta-se um novo limite para região segura de operação, estando associado à resposta dinâmica da rede, e atrelado à condição na qual o sistema, sob determinado nível de injeção de potência, é capaz de encontrar um novo ponto de equilíbrio diante de uma distorção na rede, sendo que em ambas condições operativas, nenhum dos limites anteriormente mencionados como responsáveis pela classificação de um sistema seguro, sejam violados. Através da modelagem das equações diferenciais que definem o comportamento do sistema no regime do tempo, e

utilizando o critério das áreas iguais [22] para avaliar a estabilidade do sistema, o trabalho constrói uma análise probabilística do sistema se manter seguro por um determinado período de tempo após a falha ter ocorrido.

Outra aplicação no estudo de segurança da rede é feita em [31], em 1989, abordando a aplicação de redes neurais para identificar potenciais problemas de segurança e garantir a operação estável e confiável do sistema. O artigo propõe uma abordagem baseada em redes neurais artificiais (RNA) para a avaliação da segurança do sistema elétrico. As RNAs são treinadas utilizando dados históricos de operação do sistema, que incluem informações sobre a topologia da rede, cargas, geração de energia, entre outros parâmetros relevantes. Uma vez treinadas, as RNAs foram capazes de mapear os pontos operativos que geravam condições operativas inseguras, mostrando-se como uma ferramenta auxiliar na operação em tempo real do sistema, permitindo que os operadores identifiquem rapidamente situações de risco e tomem as medidas adequadas para evitar possíveis impactos na rede. Após esse período de meados da década de 1980, a próxima abordagem de construção da região de segurança só seria feita na década de 2000.

Nos anos 2000, [32] propõe uma nova metodologia para a construção da região de segurança. Nessa metodologia a incerteza associada à variação da carga é modelada por uma lógica Fuzzy, de modo a excursioná-la entre um limite mínimo e máximo. Novamente, utiliza-se o modelo linearizado para representar o fluxo de potência na rede. Duas condições são utilizadas para representar as restrições do problema, a primeira, considerando limites rígidos, onde o fluxo das linhas deve ser inferior a um determinado limite fixo, e a segunda, considerando limites flexíveis, que explora a possibilidade das linhas operarem em condição emergencial e, portanto, com fluxo acima dos limites anteriormente definidos (apesar de também ser um valor fixo), desde que sob um tempo limitado. Naturalmente, na condição de limites flexíveis, a região de segurança obtida é maior, tendo em vista que se permite um maior fluxo nas linhas do sistema, aumentando assim o conjunto de soluções para o problema. Nesta modelagem, define-se o limite de segurança implícito, como sendo aquele obtido através das equações do fluxo de potência de maneira implícita, e o limite explícito, sendo este uma região contida no limite implícito e que representa o limite de injeções de potência que geradores devem operar para que o sistema se mantenha na operação segura. Supondo um sistema com dois geradores, a representação desses limites pode ser visualizada na Figura 8, onde o limite implícito é definido por  $S_p$  e o limite explícito por  $R_p$ . É possível observar que o limite explícito está contido no implícito, sendo obtido através da resolução de um problema de otimização linear que busca encontrar o hiperplano com maior área possível respeitando os limites do sistema. Na Figura os eixos  $P_{G1}$  e  $P_{G2}$  representam a geração de potência ativa de duas unidades geradoras e os valores  $\overline{P_G}$  e  $\underline{P_G}$  representam respectivamente os limites máximos e mínimos que as unidades geradoras devem operar para que o sistema permaneça na região segura.

Figura 8 – Região de segurança implícita e explícita.



Fonte: Extraído de [32]

É recorrente nos trabalhos citados o uso de técnicas de linearização ou outras simplificações para redução do esforço computacional associado à construção da região de segurança, evidenciando a complexidade desse processo. Entretanto, quando se avalia a aplicação desse estudo para auxílio da operação em tempo real, essa complexidade se torna ainda mais elevada conforme abordado em [33]. O trabalho destaca as principais dificuldades no uso da região de segurança para análises de estabilidade de tensão, estabilidade angular, sobrecarga, dentre outras em sistemas de transmissão de grande porte. Para este estudo, a necessidade de se avaliar diversas contingências com diferentes parâmetros, a exemplo de diferentes cenários de carga (leve, média e pesada) gera uma explosão combinatória que é o maior gargalo para a construção da região de segurança e, conseqüentemente, para análise em tempo real. Assim, para adequar a escala de tempo com o objetivo de se utilizar essa ferramenta na análise em tempo real é necessário restringir o número de parâmetros e contingências apenas aos casos críticos, sendo que identificar quais são esses casos é o maior desafio. Dentre as formas de se avaliar quais os parâmetros críticos, destaca-se a experiência dos operadores, que apesar de eficaz é de difícil reprodução, análises detalhadas no domínio do tempo e uso de ferramentas de inteligência artificial, sendo todos processos complementares entre si. Por fim, destaca-se também o uso de processamento paralelo para agilizar a análise de diferentes contingências ao mesmo tempo, o que reduz drasticamente o tempo total de processamento.

Em [34] é apresentado um modelo que combina a região de segurança em regime permanente com os limites de uma região denominada como região de segurança para pequenas perturbações, associada ao comportamento dinâmico do sistema ao sofrer uma



perturbação pequena tal que o sistema pode ser linearizado em torno do ponto inicial de operação. A partir da união desses espaços, são construídos planos que associam o nível de geração que dois geradores do sistema podem assumir de tal forma que o sistema se mantenha seguro.

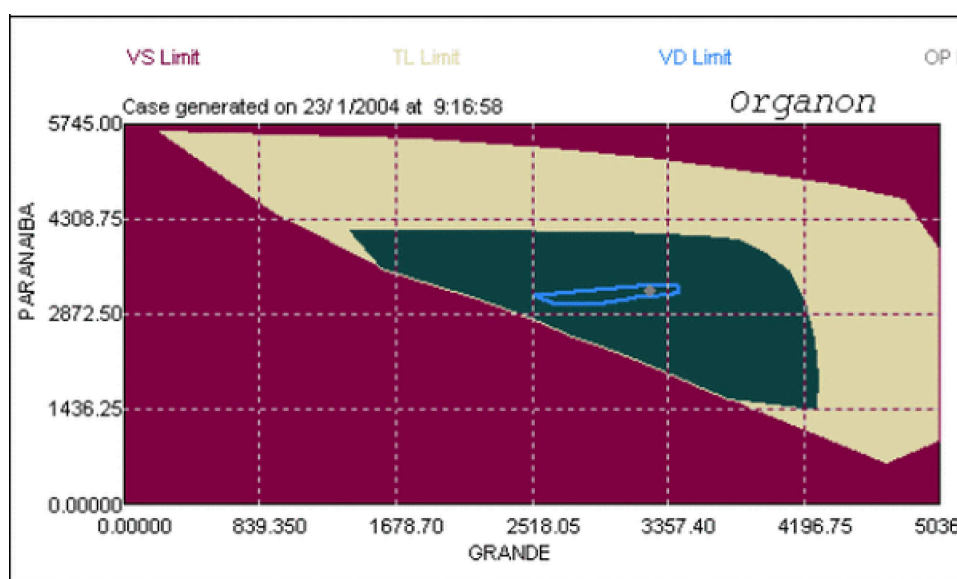
Com o foco na operação em tempo real, em 2004 [35], e posteriormente em [36], detalha o uso da região de segurança dinâmica pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) aplicado ao sistema elétrico brasileiro, detalhando outros estudos relacionados e a arquitetura de processamento utilizada. Neste trabalho destaca-se que a construção da região de segurança *off-line*, ou seja, construída previamente ao momento da operação, não é suficiente para representar o comportamento da rede durante a operação em tempo real, tendo em vista que o comportamento da rede está sujeito a muitas variações e incertezas que são ineficazes de serem representadas na simulação *off-line*, por gerar uma explosão combinatória que acarretaria um custo computacional inviável. Isso faz com que a rede possa ser representada de uma forma conservadora, ou seja, assumindo limites abaixo do que na prática ela poderia ter, ou otimistas, em que a região construída pode conter alguns pontos inseguros em seu interior, no qual algum limite seja violado.

Neste contexto de operação em tempo real, a construção da região de segurança deve ser rápida o suficiente para acompanhar as alterações no perfil da rede, de modo que boa parte dos trabalhos até então utilizavam modelos simplificados da rede para garantir o atendimento do quesito tempo, ainda que isso representasse uma perda na precisão do modelo. Entretanto, com o avanço da capacidade de processamento, a metodologia proposta no trabalho em questão garante a representação detalhada da rede sob um custo computacional acessível, equilibrando os requisitos de tempo e qualidade. Considerando que o processo de estimação de estados da rede elétrica ocorre em até 15 minutos, os estudos associados a região de segurança tinham de ser concluídos em um tempo inferior a este. Um fator crucial para a conquista dessa agilidade computacional consiste na utilização do processamento paralelo, onde um processador principal (*master*) coordena a execução dos demais processadores (*slaves*), responsáveis pela execução do sucessivos fluxos de potência para construção da região. Dentre os estudos avaliados, além da construção da região de segurança, propriamente dita, destacam-se análises de contingência e de limite de intercâmbio entre dois blocos de geração, todas as análises feitas tanto em regime permanente, quanto em regime transitório.

Em relação ao monitoramento da rede, além dos limites térmicos, de tensão e de convergência do fluxo de potência, acrescenta-se os estudos de desvios de tensão, angular e de frequência em relação ao ponto de operação inicial, margem de carregamento de geradores, dentre outros. Na Figura 9 é possível observar um exemplo de aplicação da região de segurança utilizada para avaliar o despacho de dois grupos geradores que, sob situação de contingência, geram violações na rede. Cada um dos eixos representa um grupo

gerador, e assim, a região verde contém os cenários em que o sistema consegue suportar um cenário de contingência sem violar nenhum dos seus limites operativos, em amarelo, ao menos uma contingência é capaz de implicar em violações no limite térmico, e em vermelho, os cenários em que o sistema ficará instável na ocorrência de uma contingência. Ainda nesta análise, é possível avaliar as configurações que levam a quedas de tensão da rede, representada pelo contorno em azul. A construção da região da segurança tem como parâmetros três grupos geradores, ou ainda dois grupos geradores e um grupo de carga, alterando as visões gráficas conforme as variáveis de interesse.

Figura 9 – Exemplo de aplicação da região de segurança.



Fonte: Extraído de [35].

Dando continuidade a este trabalho, apresenta-se em [37] no ano de 2010, alguns casos de uso desse tipo de solução no sistema elétrico brasileiro, dentre eles a definição do limite de geração de uma planta termoelétrica no estado de Santa Catarina, a partir do qual ocorria sobrecarga em determinadas linhas de transmissão. Outra aplicação, desta vez no Rio Grande do Sul, destaca a importância da ação corretiva de chaveamento de um banco de capacitores, sob critério de contingência N-1, de modo a eliminar as violações de tensões que tenderiam a ocorrer em tal cenário de contingência.

Em [38], uma estratégia diferente dos demais trabalhos é utilizada para a construção da região de estabilidade de tensão em regime permanente (SVSR, anteriormente apresentada em [28]), sendo um subconjunto dentro da SSR. Neste caso, é feita uma análise de sensibilidade para se definir os chamados nós fracos do sistema (*weak nodes*), entendidos como os nós mais suscetíveis a violações de tensão. A partir da definição desses nós fracos, aplica-se o método da continuação nas diferentes direções de busca para obter os limites de potência ativa e reativa que o sistema consegue suportar antes de atingir o colapso de tensão, também definido como a margem de carregamento daquele nó. A partir

da execução das margens de carregamento de um certo número de nós fracos, é possível unir as regiões formadas por elas, e sua interseção dá origem a SVSR. Por apresentar um custo computacional reduzido quando comparado aos demais trabalhos da época, o método é apresentado como uma alternativa para o uso na operação em tempo real.

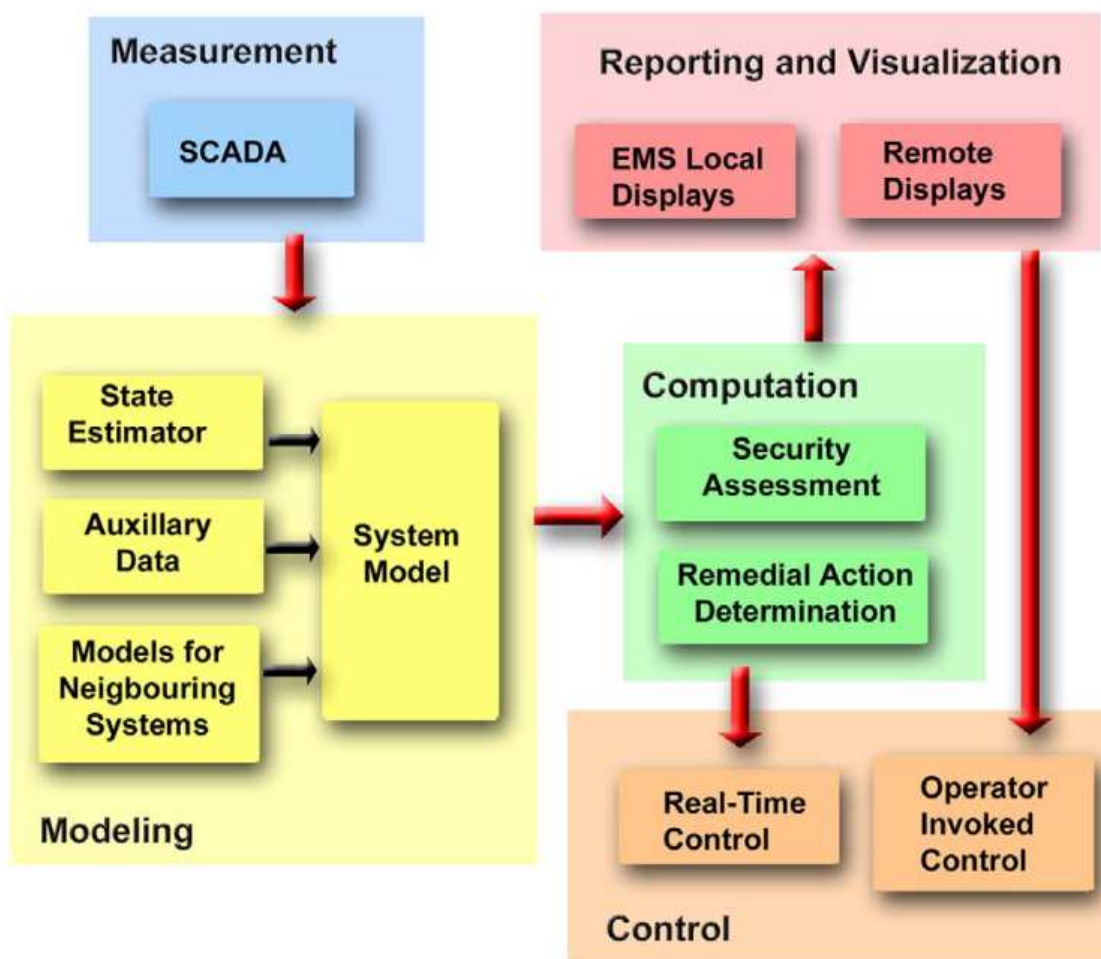
No trabalho de [39] publicado em 2006, e, posteriormente, detalhado em [40], no ano de 2007, são apresentados os critérios necessários para a análise dinâmica da segurança (do inglês, *dynamic security assessment DSA*), destacando não somente a aplicação em tempo real, mas também análises *offline*, aplicáveis a estudos de planejamento da operação ou restauração do sistema por exemplo. A Figura 10 demonstra o fluxo associado ao processo de criação da DSA, a partir dos dados coletados pelo sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (do inglês, *supervisory control and data acquisition SCADA*) estima-se o estado operativo da rede que será o ponto de partida para a modelagem do sistema, a execução dos modelos de cálculo e por fim a exportação dos resultados em ferramentas de visualização e das medidas de controle associadas ao DSA (processo também descrito em [41]). Como resultado do processo descrito, tem-se os limites detalhados na Figura 11, que garantem a operação segura sob o ponto de vista dinâmico. Falando especificamente sobre as estratégias de solução a partir dos dados coletados, elas tendem a variar de acordo com o estudo de interesse, o que de, forma generalista, pode ser resumido na Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos de solução para *online* DSA.

<b>Problema a ser estudado</b>	<b>Possível método de solução</b>
Sobrecarga térmica	Fluxo de potência
Queda ou elevação de tensão em regime permanente	Fluxo de potência
Estabilidade de tensão	Fluxo de potência baseado no acoplamento PV Simulação no domínio do tempo
Definição de área de colapso de tensão	Análise modal da matriz jacobiana
Queda ou elevação de tensão transitória	Simulação no domínio do tempo
Estabilidade transitória	Cenários de contingência Simulação no domínio do tempo
Monitoramento de pequenas oscilações de frequência	Métodos de medição Simulação no domínio do tempo Análise modal de modelos dinâmicos linearizados
Definição dos limites de estabilidade	Fluxo de potência baseado no acoplamento PV Análise modal Simulação no domínio do tempo
Definição das ações de controle preventivo e corretivo	Métodos customizados combinando os anteriores

Fonte: Adaptado de [39].

Figura 10 – Fluxograma para análise dinâmica da segurança.

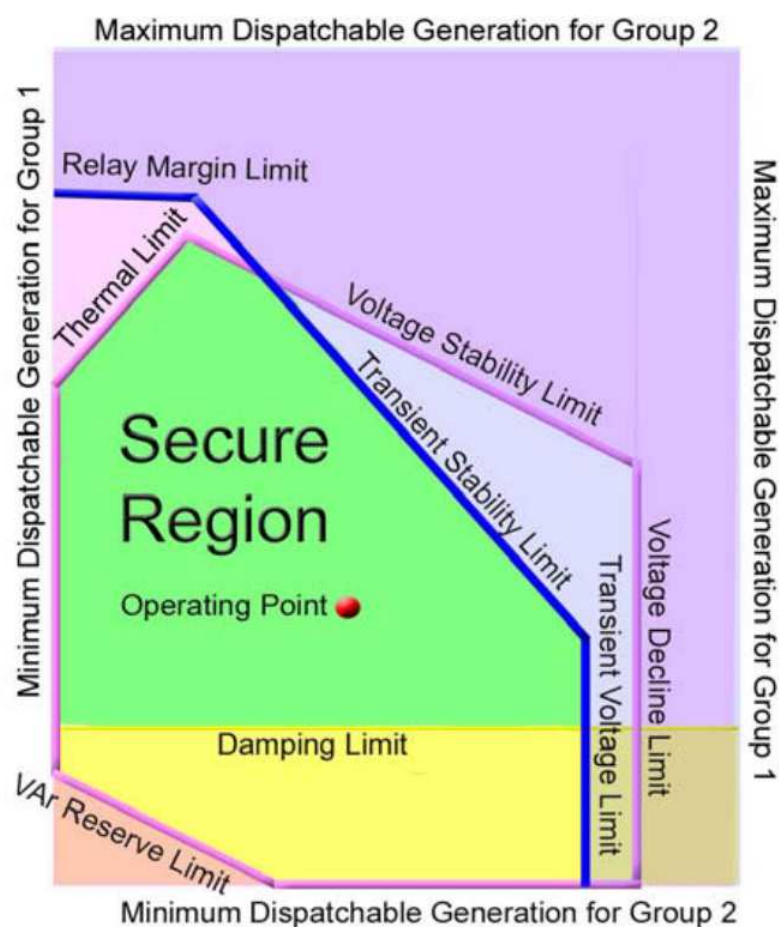


Fonte: Extraído de [42]

Além dos requisitos técnicos associados aos modelos de simulação, tratamento e armazenamento dos dados (também descritos em [43]), são especificados os requisitos de *hardware* necessários para que o estudo satisfaça os critérios de confiabilidade, escalabilidade, segurança, redundância, apresentação dos resultados, dentre outros. Após apresentar alguns softwares disponíveis no mercado para análise dinâmica da segurança, o artigo destaca a aplicação de um deles para apoio do operação da companhia *Southern Company Services* no ano de 2005, que até então tinha mais de 40 GW de capacidade instalada de geração de energia no sudoeste dos Estados Unidos. O sistema foi implementando com o objetivo de avaliar a estabilidade transitória em ciclos de estudo na base horária para um sistema equivalente de 8000 barras, onde o sistema mostrou benefícios consideráveis para restauração do sistema após a passagem do furacão Katrina em Agosto de 2005. Outras duas aplicações são mencionadas até a publicação do artigo em 2006, uma na região central dos Estados Unidos, e outra na Malásia.

Uma visão sobre os principais países que aplicam esse tipo de estudo para operação do sistema elétrico também é apresentada em [42], sendo possível observar aplicações

Figura 11 – Limites da região de segurança dinâmica.



Fonte: Extraído de [40]

também na China, Austrália, Nova Zelândia, Japão, alguns países da Europa e no Brasil. Finalmente, destaca-se a expectativa de crescimento dessas ferramentas ao redor do mundo e sua contribuição para operação de sistemas elétricos, minimizando riscos de *blackouts*. Entretanto, algumas dificuldades ainda são enfrentadas, a exemplo da precisão dos dados coletados no SCADA, que tendem a influenciar significativamente os resultados da DSA, especialmente para sistemas de grande porte, do alto custo computacional associado, principalmente relacionado ao elevado número de contingências que precisam ser avaliadas, e da alta complexidade de operação da rede, que devido a sua expansão e variabilidade de comportamento, tende a dificultar a previsibilidade de ações corretivas na rede.

Com o passar dos anos, o estudo da região de segurança se difundiu para diferentes países conforme apresentado em [42], e diferentes formas de se visualizar as informações obtidas nesses estudos foram elaboradas, a fim de facilitar a interpretação do operador mediante perturbações no estado operativo da rede e, assim, identificar uma possível ação corretiva de forma ágil, ainda que esse processo não seja feito em tempo real. Em [44], de 2009, é descrito como foi desenvolvido a visualização das regiões de segurança em

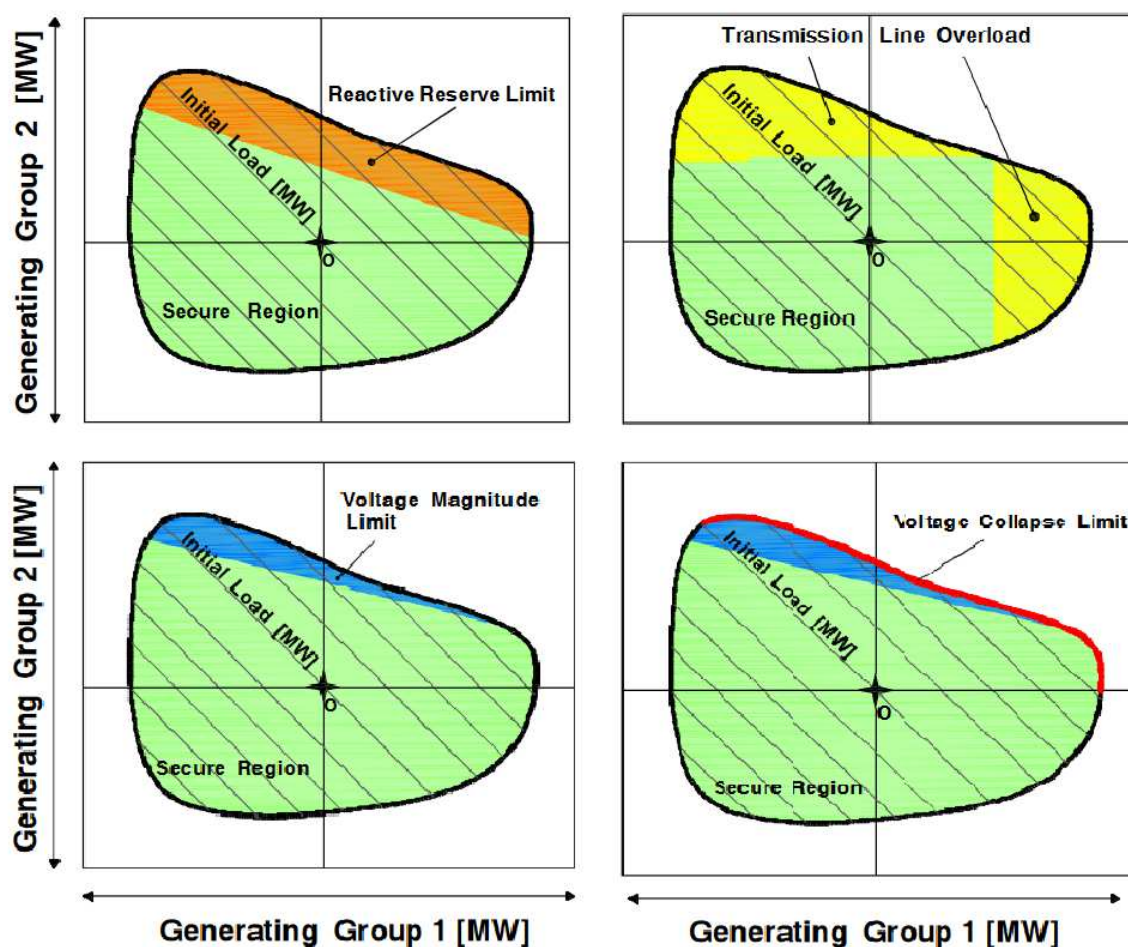
um trecho crítico no sistema elétrico do México, onde o crescimento da carga, somado a uma escassez de fontes geradores próximas, propiciava condições inseguras de operação. Nesse estudo são utilizados gráficos denominados namogramas, que representam nos eixos cartesianos a potência ativa gerada por dois grupos geradores principais e de acordo com cada ponto inserido na região formada, é possível avaliar a segurança do sistema quanto a margem de potência reativa, sobrecarga da rede transmissão, violações de tensão, e colapso de tensão. Cada ponto presente nessa região é proveniente da resolução de um fluxo de potência e define um cenário de geração para uma carga específica. No centro dessa região está o ponto de operação inicial do sistema, já conhecido.

Na Figura 12 é possível visualizar alguns exemplos de namogramas, onde as linhas diagonais representam um patamar de carga, e cada cor dentro da região formada representa uma classificação da condição operativa, sendo verde a operação segura, laranja a região em que houve problemas com margem de reativo, amarelo, regiões com sobrecarga de linhas, azul, violação de tensão, e vermelho o limiar em que ocorreria o colapso de tensão da rede. Tais visualizações já estão replicadas dentro de *softwares* comerciais e auxiliam a atividade dos operadores na identificação do estado da rede e quais medidas preventivas ou corretivas podem ser tomadas para retornar uma condição de segurança.

Em [45], apresenta-se uma métrica para avaliação do nível de segurança de determinado ponto de operação, a fim de estabelecer comparações entre diferentes cenários operativos e identificar pontos que estão próximos à condição insegura. Uma vez classificados os pontos com menor ou maior nível de segurança, é possível tomar ações preventivas para afastar o máximo possível, dentro de condições técnicas e econômicas viáveis, o cenário operativo do sistema. Assim, define-se o conceito de margem de segurança, sendo a menor distância no espaço euclidiano (vide namogramas apresentado na Figura 12) entre o ponto de operação atual e o limite de segurança mais próximo, cuja representação normalmente é feita por unidade (p.u.), sendo uma razão em relação ao ponto base de operação.

Conciliando o uso da SSR com a tomada de ações corretivas para ampliação da margem de segurança do sistema, o trabalho [46], publicado em 2011, destaca a atuação do controle remoto de tensão [47] para modificação dos limites restritivos da rede. Vale destacar que a atuação do controle remoto de tensão implica na alteração do comportamento da rede, de tal modo a modificar os limites restritivos da região segura, podendo aumentá-la ou reduzi-la, cabendo ao usuário avaliar tais cenários. No artigo apresenta-se uma aplicação em que a atuação do controle remoto de tensão foi eficiente para expandir a região de segurança, sendo que a Figura 13a a região formada sem o controle, e Figura 13b a região após a inserção dele. Com a alteração o limite de tensão, definido pela curva amarela, é significativamente ampliado, enquanto que a margem de potência reativa é diminuída, uma vez que o controle de tensão explora a potência reativa

Figura 12 – Diferentes visualizações de SSR com gráficos namogramas.

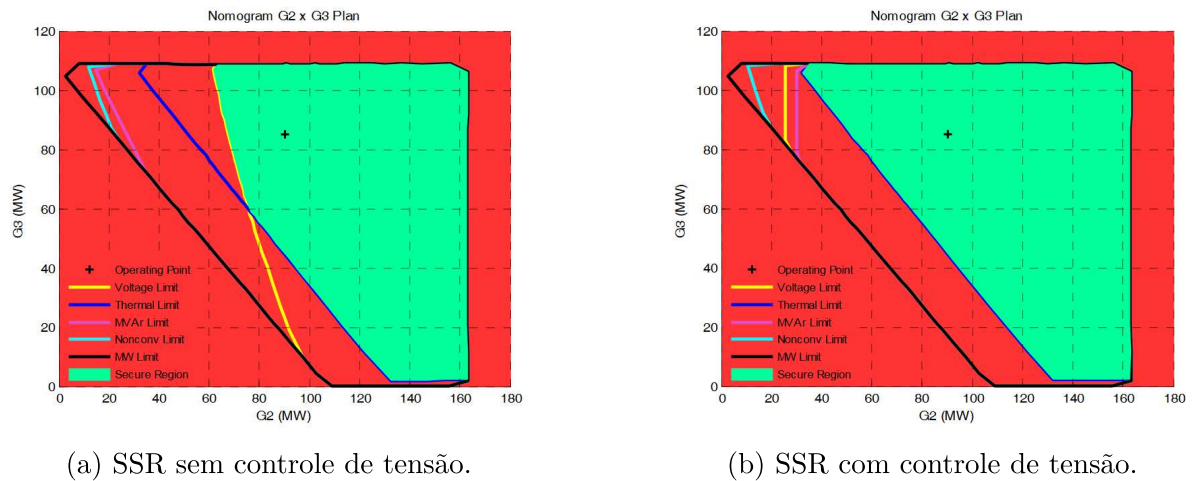


Fonte: Extraído de [44].

dos geradores. Entretanto, a restrição da margem de potência reativa não é suficiente para limitar a área segura do sistema, que passa a contar, portanto, com um significativo aumento, melhorando assim a operação do sistema.

Poucos anos depois, no trabalho [48], apresenta-se outra característica que, além do controle remoto de tensão, também afeta, significativamente, as margens de segurança do sistema, sendo esta associada à modelagem da rede. Neste trabalho se evidencia o impacto da modelagem de carga nos limites de segurança da rede. Através da modelagem ZIP definida em [22], as potências ativas e reativas tornam-se funções das tensões nas barras do sistema, podendo ser obtidas cada uma pela soma de três parcelas, potência constante ( $P^{cte}$ ), corrente constante ( $I^{cte}$ ) e impedância constante ( $Z^{cte}$ ). Sob esta concepção, a parcela  $P^{cte}$  é aquela que se mantém fixa e independente do valor de tensão, a parcela  $I^{cte}$  aquela que varia linearmente com a variação da tensão, e a parcela  $Z^{cte}$  aquela cuja potência varia de forma quadrática com a variação de tensão. Nesse sentido, o comportamento da carga do sistema pode ser representado por diferentes combinações

Figura 13 – Comparação SSR com e sem controle de tensão.



Fonte: Extraído de [46].

entre esses modelos, sendo que cada uma dessas parcela pode ampliar ou reduzir sua influência sobre o comportamento total de carga de acordo com o fator de participação associado a ela. Neste contexto, observa-se como diferentes ponderações do modelo ZIP afetam a área da região de segurança, podendo tornar o modelo mais ou menos restritivo. Ainda neste trabalho, destaca-se como o processamento paralelo é capaz de aumentar a eficiência computacional na construção da SSR, reduzindo em quase 80% o tempo necessário para construção da região, mediante alteração de 1 para 4 núcleos de processamento de dados.

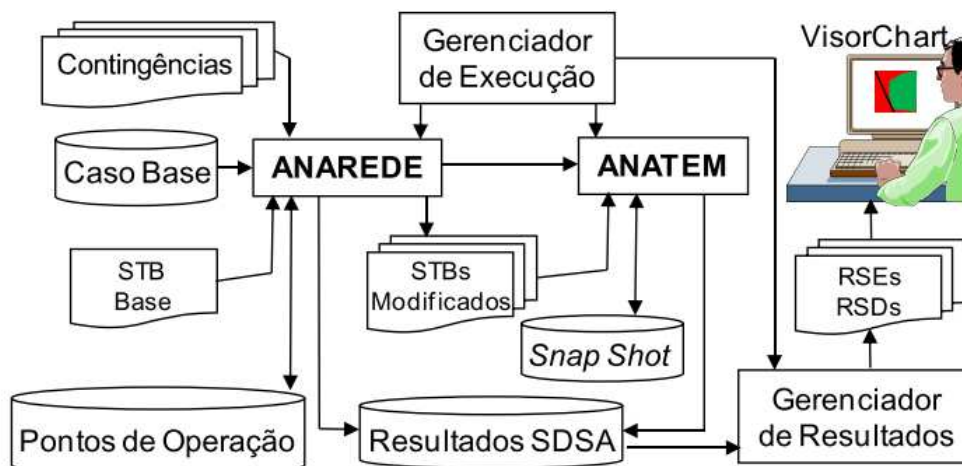
No ano de 2012, em [49], pesquisadores do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em parceria com universidades federais brasileiras descrevem o processo de desenvolvimento de uma ferramenta para análise de segurança estática e dinâmica de SEPs com aplicação *online* e *offline*, criada através da integração entre de ferramentas já consolidadas no país para análises de sistemas elétricos de potência, *software* ANAREDE, para estudos de regime permanente, e *software* ANATEM para estudos dinâmicos no domínio do tempo [50] cuja interface é resumida na Figura 14.

Dentre os pontos da arquitetura citados, destaca-se a aplicação de processamento paralelo utilizando o recurso MPI (do inglês, *Message Passing Interface*) do ambiente Linux, como forma de agilizar o estudo de segurança, dispensando o uso de hipóteses simplificadoras que reduzem a confiabilidade dos resultados e, mantendo assim, a robustez de métodos de simulação completos, a exemplo do método *Full-Newton* para estudos de fluxo de potência, e métodos de integração tradicionais bem como análise de estabilidade a pequenos sinais baseada em análise de autovalores, para simulação de transitórios eletromecânicos.

Dentre os resultados apresentados, destaca-se a aplicação da ferramenta para um



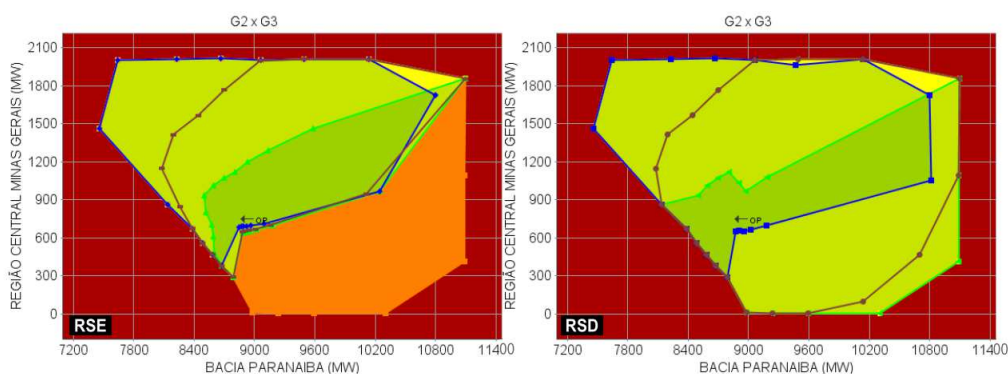
Figura 14 – Integração entre ferramentas para análise de segurança estática e dinâmica.



Fonte: Extraído de [49].

caso real utilizando a rede do Sistema Interligado Nacional (SIN), na qual se enfatiza como as variações nos modelos simulados interferem na região segura de operação, vide Figura 15, sendo a região à esquerda, construída utilizando uma modelagem de potência constante para carga, e à direita, modelagem ZIP. Evidenciando assim, a importância da qualidade dos dados e modelos para a precisão da região de segurança, tema também tratado em [51, 52], e em voga devido ao episódio recente do blecaute ocorrido em agosto de 2023 [53]. Outra aplicação da análise de segurança estática e dinâmica é apresentado em [54] em 2016, onde se avalia os impactos para a operação do sistema diante da entrada de gerações eólicas no cenário nacional.

Figura 15 – Comparação região de segurança estática e dinâmica.



Fonte: Extraído de [49].

## 2.2 Região de segurança em sistemas de distribuição

Até então, todos os trabalhos mencionados anteriormente fazem referência à região de segurança para análise de redes de transmissão. Somente no ano de 2012, tem-se uma das primeiras menções ao conceito de região de segurança inserido em redes de distribuição,

publicado em [55], motivado pelo crescimento de redes inteligentes (do inglês, *smart grids*), em que a disponibilização de dados em tempo real serviria como insumo para a construção desta análise. Além disso, com o crescimento significativo da geração distribuída ao redor do mundo, novos desafios associados a operação da rede seriam encontrados, de modo que a análise da SSR passa a ser uma ferramenta auxiliar de alto valor. Assim, inaugura-se o conceito de região de segurança para sistemas de distribuição (do inglês, *distribution system security region DSSR*).

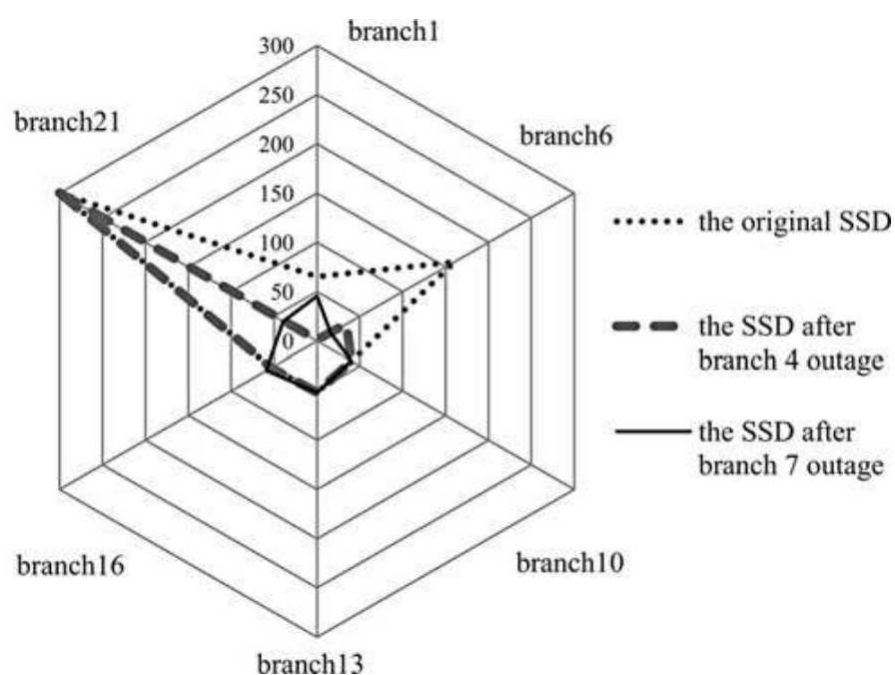
A DSSR foi desenvolvida sob o ponto de vista de contingência N-1, estabelecendo, portanto, quais pontos operativos garantiriam uma operação segura diante da saída de operação uma linha ou transformador, de forma que, durante a falha que levou a esta condição, o sistema consiga operar mediante fechamento de alguma chave seccionadora normalmente aberta. Enquanto em sistemas de transmissão, um ponto de operação é definido pelas potências injetadas em cada um dos nós, em sistemas de distribuição, essa condição é definida pela potência nos transformadores das subestações e pela potência nas cargas, tendo em vista que o elevado número de nós inviabiliza a análise de todos os pontos da rede, sendo esta uma característica exclusiva da DSSR em relação à SSR. Baseado neste conceito, essa primeira análise feita sobre a região de segurança leva em consideração a potência dos transformadores na SE e a possibilidade de transferência de cargas entre alimentadores distintos, não avaliando características como o nível de tensão ou limites térmicos dos demais equipamentos. Dessa forma, a construção da DSSR é feita através da modelagem e interseção das restrições do balanço de potência, não resolvendo o fluxo de potência propriamente dito. Apesar de o conceito da DSSR se basear na contingência de linhas e transformadores, este primeiro trabalho foca na análise exclusiva dos transformadores, que tendem a ser os casos mais críticos e restritivos para a operação da rede, ainda que menos frequentes.

Ainda em [55], é apresentado um novo índice para avaliar o nível de segurança de determinado ponto de operação, sendo definido como a distância do ponto de operação a todos os limites de segurança. Apesar desta definição remeter àquela apresentada em [45], trata-se de um valor que pode ser positivo ou negativo, diferindo-se, portanto, do conceito de distância euclidiana. Sendo um valor positivo, caracteriza um ponto de operação seguro sob contingência. Sendo um valor negativo significa que, diante de uma contingência de um transformador de alguma SE, a carga à jusante daquele transformador não pode ser transferida em sua totalidade para outro, sendo limitada, ou pelo limite de intercâmbio entre as regiões, ou pela sobrecarga do transformador da região vizinha.

Outra forma de se avaliar o nível de segurança em regime permanente de um determinado ponto de operação é apresentado em [56] de 2013. Nesse caso, essa grandeza que avalia o nível de segurança da rede é denominada distância de segurança, sendo descrita a metodologia utilizada para calcular a distância de cada ponto de operação em

relação a todas as restrições ativas que compõem a SSR. A partir da identificação das restrições ativas, uma visualização diferenciada dos demais trabalhos é apresentada, a fim de exibir a variação da distância de segurança em situações de faltas ou variações de carga. Na Figura 16 é possível acompanhar a variação da distância das seis linhas mais restritivas do sistema em estudo, mediante condições de falta na linha 4 e falta no linha 7. Nesta visualização é possível observar quais linhas são mais influenciadas pela ocorrência da falha, alterando sua distância de segurança. No exemplo em questão, é possível observar que a saída do linha 4, promove uma redução significativamente na distância de segurança da linha 1. Dessa forma, a visualização proposta no trabalho em questão, além de trazer o nível de segurança de determinado ponto de operação através da distância de segurança, estima, de forma quantitativa, o quanto essa margem de segurança pode alterar diante de uma situação de contingência ou variação da carga.

Figura 16 – Comparação distância de segurança antes e após contingências.



Fonte: Extraído de [56].

Em continuidade ao trabalho de 2012 [55], em [57] utiliza-se a DSSR como suporte para o controle e manutenção em tempo real da rede em *smart grids*. Essa condição envolve uma integração entre o sistema de aquisição de dados e estimação, os sistemas para análise da rede em tempo real (execução do fluxo de potência, análises de falta, análises de contingência, etc) e os sistemas de controle e proteção para isolar faltas e transferir cargas. Através da construção da DSSR em tempo real, geram-se alertas em condições que a distância de segurança é negativa. Uma vez identificados condições operativas inseguras em caso de contingência, essa rede inteligente é capaz de tomar ações preditivas

a fim de trazer o ponto de operação para dentro da região segura. Entretanto, mesmo que o sistema já esteja em uma condição operativa segura, é possível ainda otimizar as margens de segurança, de modo a alterar o ponto de operação para que sua distância de segurança seja máxima. Por fim, operando na condição de emergência e restauração da rede, o controle projetado é capaz de transferir carga entre transformadores ou entre subestações, observando o máximo de sobrecarga temporária que esses equipamentos podem atingir. Reunindo todos esses atributos, essa ferramenta seria capaz de otimizar a operação do sistema, trazendo uma análise de risco de determinadas condições operativas e minimizando os riscos de indisponibilidade no atendimento a carga. Ao final do trabalho, é apresentado um estudo de caso, em que se exemplificam ações de transferência de carga para transferir um ponto inicial de operação inseguro, para uma condição segura, mediante a transferência de carga entre os transformadores da rede.

Alguns anos depois, em 2018, em [58] aprofunda-se a modelagem da DSSR a fim de viabilizar sua aplicação na operação em tempo real. Em contraste com as redes de transmissão, a característica radial e desequilibrada da rede de distribuição, bem como sua constante expansão dentro de redes urbanas, tornam a análise em tempo real significativamente mais complexa. Neste contexto, o elevado número de topologias da rede diante de um universo de contingências tornam a análise ponto a ponto proibitiva para construção da DSSR. Assim, modelos linearizados são utilizados com o intuito de construir o limite da região segura, não avaliando até o momento restrições de tensão ou a execução do fluxo de potência. Em comparação com [55], os avanços na precisão do modelo devem-se à análise de contingência, não somente dos transformadores, mas também dos alimentadores que compõem a rede de distribuição. Assim, apresenta-se toda a modelagem que essa nova premissa implica quanto as restrições do problema. Somado a isso, prova-se que, sob tal modelagem, a região de segurança formada é uma região densa, de modo que todos os pontos contidos dentro dela são, de fato, pontos de operação seguros. Mais do que isso, tal região formada, através da interseção de diversas restrições, definidas por planos no espaço euclidiano, geram uma região convexa.

No ano de 2019, em [59], a DSSR é utilizada em conjunto com o controle *volt/var* [60] de dispositivos inversores em redes com GD, a fim de otimizar a operação do sistema, garantindo uma condição operativa segura e com perdas mínimas. Na modelagem apresentada, a região de segurança é delimitada pela interseção entre os limites de tensão dos nós (do inglês, *static voltage security region* SVSR) e pelos limites térmicos das linhas (do inglês, *thermal security region* THSR) representado pela ampacidade dos condutores. A não linearidade das equações que definem o fluxo de potência e seus dispositivos de controle, eleva significativamente o tempo de solução do problema, de modo que um modelo linearizado para representação a injeção de potências pela GD é apresentado. Tal modelo apresenta bons resultados quando comparados aos demais na literatura, e configura uma interessante aplicação para operação de redes de distribuição ativas, que contam com

participações crescentes de GD.

Em 2020, [61] avalia-se a DSSR sob condições normais de operação (cenário N-0), diferentemente do cenário N-1 de contingência avaliado na maioria dos trabalhos. Esse estudo se faz importante uma vez que, certos pontos operativos que atendem as restrições no cenário de contingência podem não respeitar as restrições de operação do sistema em condições normais de operação. Além do conceito de DSSR, define-se também a capacidade total de fornecimento (do inglês, *total supply capability*), como sendo a máxima carga que o sistema de distribuição é capaz de alimentar. Neste estudo da DSSR, avalia-se a sobrecarga de transformadores e linhas. Outro destaque está na mensuração da área da região segura formada, como sendo um novo parâmetro para mensuração do nível de segurança, além do conceito de distância ou margem de segurança definida nos demais trabalhos até então. Quando aplicado a um sistema teste, observa-se que a área (ou o volume, a depender de quantas variáveis estão sob análise) sob condição normal de operação é significativamente maior que aquela sob condição de contingência, sendo uma característica já esperada tendo em vista que neste cenário o sistema se encontra ausente de algum equipamento, tornando a operação restrita.

Assim como [59], em [62] avalia-se a região de segurança para redes de distribuição ativa, em que a participação de GD é considerável, de modo que o fluxo de potência passa a assumir um caráter bidirecional. Como consequência desse fluxo bidirecional, observam-se valores negativos nos gráficos que definem a DSSR, obtendo novos perfis quando comparados a redes passivas. Neste trabalho, avalia-se as principais alterações nesses perfis quando sujeito a penetrações elevadas de GD.

Consolidando os conceitos de SVSR, THSR e DSSR, juntamente com a visualização gráfica em 2D através de namogramas e também em regiões 3D (vide Figura 5), em [63] é proposta a construção da região de segurança avaliando simultaneamente os limites de tensão dos nós, limites térmicos dos equipamentos, limites de intercâmbio em condições de contingência e limites de convergência do fluxo de potência em sistemas de distribuição. Neste caso, a visualização da DSSR se dá através dos eixos de potência ativa das cargas, a potência que flui pela subestação e a potência injetada pela GD.

A modelagem da rede é feita através do *software* OpenDSS desenvolvido pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI)[64] permitindo retratar com detalhes a rede de distribuição, de modo que as características construtivas como a impedância e geométricas, como altura e espaçamento entre os condutores, são refletidas na matriz de impedâncias que será utilizada para execução do fluxo de potência. Tal construção permite avaliar os desequilíbrios na rede, mediante a resolução do fluxo de potência trifásico, em que cada fase é monitorada. Tal nível de detalhamento permite uma identificação precisa dos limites de segurança da rede, o que por sua vez demanda um elevado esforço computacional. Adicionalmente à análise de segurança da rede, avalia-se também a região operativa em

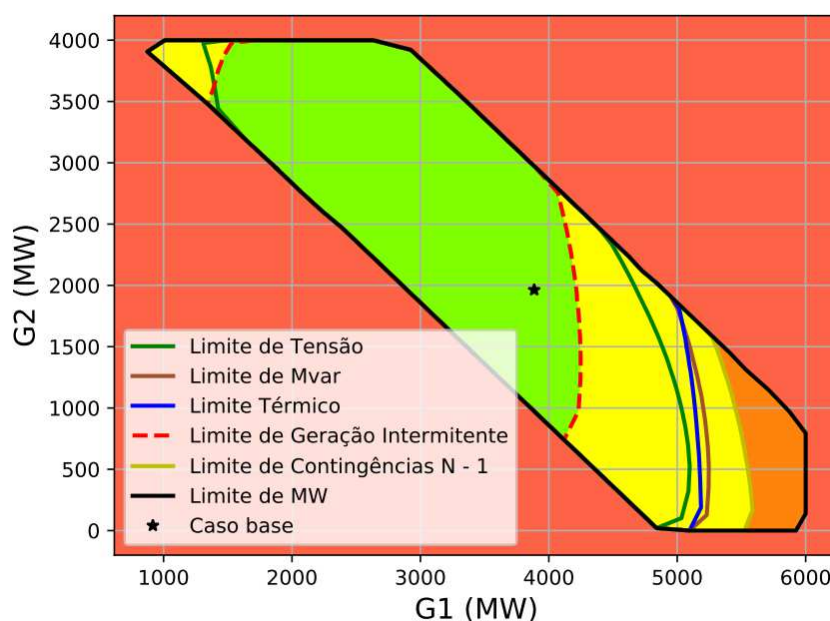
que o sistema apresentar perdas elevadas em relação ao ponto original de operação, o que pode ser utilizada como uma ferramenta de apoio à operação da rede sob o ponto de vista de eficiência energética. Por tais características destaca-se um grande potencial de aplicação do método proposto como suporte para operação e planejamento dos sistemas de distribuição, em especial, em redes com crescimento de REDs.

### 2.3 Estudos recentes sobre região de segurança

Nos trabalhos [48] e [63], a construção da região de segurança em é feita através da execução de sucessivos fluxos de potência, com um incremento fixo de potência entre as interações. Entretanto, em [65], de 2021, propõe-se uma formulação alternativa para esse processo de busca durante a construção da SSR em sistemas de transmissão. Neste trabalho o incremento de potência é variável a cada iteração, sendo definido através de uma meta-heurística, que pode ser entendida como um processo eficiente de busca da solução para um problema de difícil resolução. Nesta aplicação, o problema a ser otimizado é a máxima margem de segurança que o sistema pode apresentar, e meta-heurística utilizada é baseada na estratégia de enxame de partículas (do inglês, *particle swarm optimization* PSO) proposta na década de 1990 [66]. Nesta técnica, cada ponto operação é representado pela posição de uma partícula no espaço, e a atualização dessa posição é dada em função de características destas partículas, como sua inércia e velocidade, além de aspectos de memória e interação social. Diante desta técnica, o máximo incremento de potência para as diferentes regiões de busca é obtida de forma agilizada, reduzindo o tempo para construção da SSR, conciliando a qualidade da solução devido a representação não linear do fluxo de potência, com a agilidade de resolução que viabiliza sua aplicação em tempo real, gerando grande potencial de aplicação para sistemas de transmissão.

Diante do desafio da operação do sistema frente à alta intermitência das fontes não despacháveis como eólica e solar, o trabalho [67] publicado em 2020, modela o limite da intermitência dessas fontes nas restrições que compõem a SSR, de forma a mapear os pontos operativos que sofreriam alguma violação de restrição diante da variação abrupta na potência das fontes renováveis. Para isso, são inseridas potências incrementais nas equações de resíduo de potência (descritas em [68]) representando a variação na potência dos geradores eólicos devido a alteração da velocidade do vento. Diante disso, adiciona-se ao fluxograma apresentado em [48] uma etapa referente a contingência dos parques geradores, representando a variação de sua geração, que pode ser positiva ou negativa, em paralelo à etapa de análise de contingência N-1. Assim, para cada ponto de operação além de avaliar a segurança sob condições normais ou em contingência, também são avaliadas as restrições às quais sistema estaria sujeito mediante variações significativa da geração das fontes renováveis, sendo passível de representar tanto fontes de geração eólica quanto fotovoltaicas.

Figura 17 – SSR considerando variabilidade das fontes renováveis.



Fonte: Adaptado de [67].

Nesse cenário, um sistema de classificação do nível de segurança através de cores é utilizado, tal como aquele apresentado em [35], porém referindo-se a uma nova condição operativa que seria a intermitência da geração. Na Figura 17, é possível avaliar o nomograma que caracteriza a operação do sistema sob a análise de dois grupos geradores. Em verde, destaca-se a região em que todas as restrições são respeitadas, ainda que sob contingência N-1 ou intermitência de geração. Em amarelo, as condições em que ao menos uma restrição é violada em razão da variação abrupta das fontes renováveis. Em laranja, a região em que apenas o limite de convergência do fluxo de potência não foi violado. Por fim, em vermelho, a região que contém os pontos de operação inseguros em qualquer cenário.

Em 2022, [69] avalia como a entrada de novos REDs além da GD, em particular, da resposta a demanda e sistemas de armazenamento de energia, influenciam na formação da DSSR. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento são utilizados como suporte para atendimento a carga, injetando potência ativa na rede, ou absorvendo o excedente de geração, absorvendo potência ativa da rede. Já a resposta a demanda é implementada como um corte de carga virtual, sendo um fator percentual que representa o nível da carga do sistema que será reduzida em comparação com a carga original. É possível visualizar como a participação desses recursos afetam a DSSR e como sua adequada manipulação em suporte a rede pode transformar pontos operativos inseguros em pontos seguros, sem que o ponto de operação seja deslocado no espaço euclidiano, mas apenas modificando as restrições que configuram o contorno da DSSR. Fica claro portanto que os REDs, a exemplo de baterias e resposta a demanda podem prestar serviço de suporte a rede,

contribuindo para a continuidade e confiabilidade da operação.

Também em 2022, em [70], propõe-se outra possibilidade de suporte à rede de distribuição através dos REDs, neste caso, trata-se do suporte de potência reativa por parte das fontes de geração distribuída por meio de serviço ancilar para controle de tensão. Para esta análise, utiliza-se o fluxo de potência trifásico, de modo que as fontes de GD variam seu fator de potência conforme a necessidade de potência reativa para controlar da tensão da barra de conexão no valor especificado. Nessa tratativa, as barras em que os geradores estão conectados são modeladas tais como barras PV para execução de fluxo de potência em sistemas de transmissão, e o controle dos dispositivos inversores conectados a GD é baseado na estratégia de controle *volt/var*, sendo recorrente em trabalhos como [18, 19, 71, 72, 73]. Observa-se que a prestação de serviço ancilar por parte da GD é capaz de aumentar a área da DSSR, contribuindo para a operação segura do sistema.

Finalmente, trabalhos recentes datados do final de 2022 e meados de 2023, como [74, 75], aprimoraram o uso do método PSO a fim de reduzir ainda mais o esforço computacional durante a construção da SSR em sistemas de transmissão. Ao alterar a forma como a velocidade da partícula altera no decorrer do tempo, é possível garantir uma convergência acelerada em relação ao método tradicional. A essa nova formulação proposta em [75], dá-se o nome de otimização por enxame de partículas com atualização adaptativa da velocidade (do inglês, *adaptive velocity update relaxation particle swarm optimization* AVURPSO), que apresentam se destaca por uma rápida convergência quando comparada ao método PSO tradicional.

## 2.4 Considerações parciais

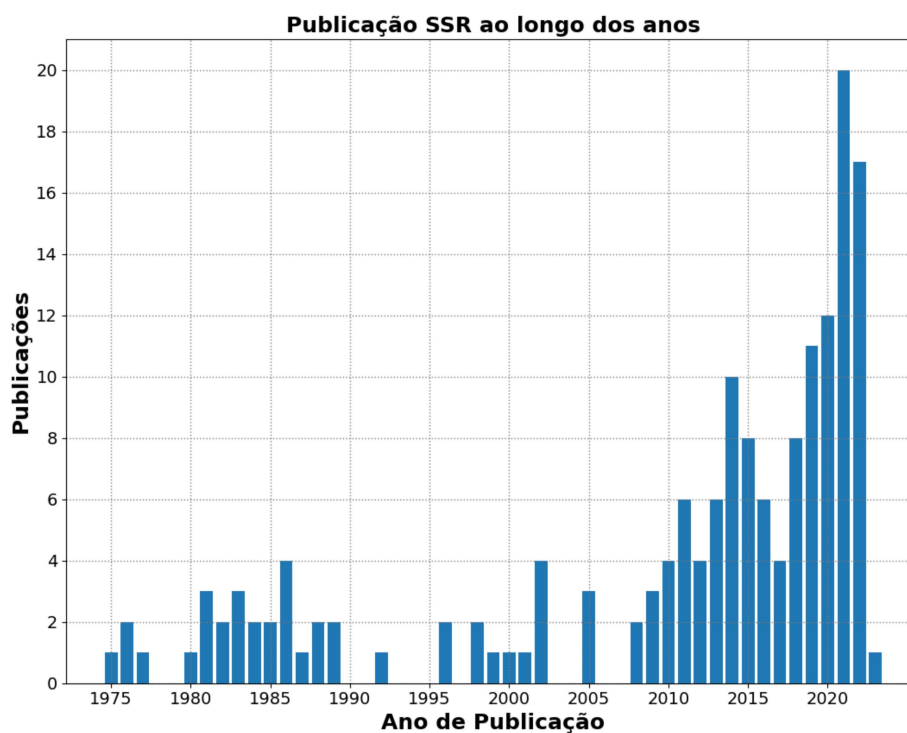
Na Figura 18 é possível avaliar o crescimento do número de publicações referentes ao tema de região de segurança em sistemas elétricos nas últimas décadas, tendo um crescimento mais significativo na década de 2010, onde se iniciam as primeiras aplicações do tema para área de distribuição.

Em seguida, na Tabela 2, encontra-se um resumo sobre os principais trabalhos mencionados na revisão bibliográfica acerca do tema de região de segurança. De modo geral, é possível observar que a literatura sobre regiões de segurança vem crescendo nos últimos anos, porém, sobretudo, relacionada a sistemas de transmissão, sendo sua aplicação em sistemas de distribuição ainda escassa. Além disso, os trabalhos que abordam a SSR em sistemas de distribuição, em sua maioria, utilizam modelos simplificados da rede, com fluxo de potência linearizado, ou ainda, constroem os limites da região de segurança apenas pelas equações de balanço, não executando o fluxo de potência, e portanto, sendo indiferentes quanto ao estado operativo da rede. Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo ampliar a literatura acerca do tema de região de segurança em sistemas de distribuição, adotando a representação trifásica e desequilibrada das redes de distribuição ao longo da



solução do fluxo de potência, a fim de melhorar a qualidade da SSR construída. Também como contribuição deste trabalho, destaca-se a proposição de meta-heurística baseada na otimização de enxame de partículas (PSO) para a construção da região de segurança em sistemas de distribuição, aplicação não encontrada até o momento na literatura.

Figura 18 – Evolução do número de publicações sobre SSR ao longo dos anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Revisão da literatura sobre SSR.

Autor	Ano	Rede	Potências	Modelo rede	Estratégia solução	Limites avaliados	Tempo	Regime	Referência
Hnyilicza	1975	Transmissao	P	Linearizado	Fluxo potência CC	Contingência N-1; Linha	<i>Offline</i>	Permanente	[21]
Banakar	1981	Transmissao	PQ	Não Linear	Método Numérico	Gerador; Linha; Tensão	<i>Offline</i>	Permanente	[25]
Dersin	1982	Transmissao	p	Linearizado	Fluxo potência CC; Modelo de Transportes	Linha; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[26]
Wu	1982	Transmissao	PQ	Não Linear	Método Desacoplado	Gerador; Linha; Tensão; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[27]
Liu	1985	Transmissao	PQ	Não Linear	Método Desacoplado	Tensão	<i>Online</i>	Permanente	[28]
Liu	1986	Transmissao	P	Linearizado	Fluxo potência CC	Contingência N-1; Gerador; Linha	<i>Online</i>	Permanente	[29]
Wu	1988	Transmissao	PQ	Não Linear	Método Desacoplado	Estabilidade Transitória; Linha; Tensão	<i>Offline</i>	Permanente; Transitório	[30]
Emmanuel	1989	Transmissao	PQ	Não Linear	Rede neural	Contingência N-1; Gerador; Linha ; Tensão	<i>Online</i>	Permanente	[31]
Morison	1999	Transmissao	PQ	Não Linear	Métodos para solução de fluxo de potência	Contingência N-1; Estabilidade de Tensão; Térmico; Tensão	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[43]
Sun	2000	Transmissao	P	Linearizado	Fluxo potência CC; Lógica fuzzy	Gerador;	<i>Online</i>	Permanente	[32]
Jardim	2000	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência ótimo; Fluxo de potência Continuado; Inteligência Artificial	Contingência N-1; Estabilidade Angular; Estabilidade Tensão	<i>Online</i>	Transitório	[33]
Yu	2002	Transmissao	PQ	Não Linear	Método Desacoplado; Rede Neural	Estabilidade Transitória; Tensão	<i>Offline</i>	Permanente; Transitório	[34]
Jardim	2004	Transmissao	PQ	Não Linear	Método Full Newton; Fluxo de potência Continuado	Contingência N-1; Desvios (Tensão, Angular e Frequência); Intercâmbio; Tensão; Térmico	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[35]
Morison	2004	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência continuado; Analise modal; Modelos híbridos	Contingência N-1; Estabilidade (Tensão, Frequência); Térmico; Tensão;	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[41]
Yu	2005	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência continuado; Análise modal de sensibilidade (weak nodes)	Tensão	<i>Online</i>	Permanente	[38]
Jardim	2006	Transmissao	PQ	Linearizado/ Não Linear	Fluxo potência CC; Full Newton; Synthetic Dynamic Power Flow; Fluxo de potência Continuado; Fluxo de potência ótimo; Análise de sensibilidade	Contingência N-1; Desvios (Tensão, Angular e Frequência); Intercâmbio; Tensão; Térmico	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[36]
Wang	2006	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência continuado; Analise modal; Modelos híbridos	Contingência N-1; Estabilidade (Tensão, Frequência); Térmico; Tensão;	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[39]
Morison	2006	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência continuado; Analise modal; Modelos híbridos	Contingência N-1; Estabilidade (Tensão, Frequência); Térmico; Tensão;	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[42]

(continua na próxima página)

Tabela 2: Revisão da literatura sobre SSR.

(Continuação)

Autor	Ano	Rede	Potências	Modelo rede	Estratégia solução	Limites avaliados	Tempo	Regime	Referência
Morison	2007	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência continuado; Análise modal; Modelos híbridos	Contingência N-1; Estabilidade (Tensão, Frequência); Térmico; Tensão;	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[40]
Sarmiento	2009	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência continuado; Fluxo de potência convencional	Colapso Tensão; Contingência N-1; Gerador; Linha; Tensão	<i>Offline</i>	Permanente	[44]
Neto	2010	Transmissao	PQ	Linearizado/ Não Linear	Fluxo potência CC; Full Newton; Synthetic Dynamic Power Flow; Fluxo de potência Continuado; Fluxo de potência ótimo; Análise de sensibilidade	Contingência N-1; Desvios (Tensão, Angular e Frequência); Intercâmbio; Tensão; Térmico	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[37]
Almeida	2011	Transmissao	PQ	Não Linear	Full Newton	Contingência N-1; Gerador; Linha; Tensão	<i>Offline</i>	Permanente	[46]
Alves	2012	Transmissão	PQ	Não Linear	Método Full Newton	Contingência N-1; Estabilidade; Térmico; Tensão	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[49]
Xiao	2012	Distribuição	P	Linearizado	Interserção restrições de balanço	Contingência N-1; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[55]
Chen	2013	Transmissao	P	Linearizado	Fluxo potência CC	Linha; Gerador	<i>Offline</i>	Permanente	[56]
Xiao	2014	Distribuição	P	Linearizado	Interserção restrições de balanço	Contingência N-1; Transformador	<i>Online</i>	Permanente	[57]
Alves	2016	Transmissão	PQ	Não Linear	Método Full Newton	Contingência N-1; Estabilidade; Térmico; Tensão	<i>Online</i>	Permanente; Transitório	[54]
Xiao	2017	Distribuição	P	Linearizado	Interserção restrições de balanço	Contingência N-1; Linha; Transformador	<i>Online</i>	Permanente	[58]
Yang	2018	Distribuição	PQ	Linearizado	Interserção entre restrições de balanço; Otimização volt/var	Contingência N-1; Linhas; Tensões, Térmicos; Transformadores;	<i>Online</i>	Permanente	[59]
Xiao	2020	Distribuição	P	Linearizado	Interserção restrições de balanço	Linha; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[61]
Tavela	2020	Transmissao	PQ	Não Linear	Full Newton	Contingência N-1; Gerador; Intermitência Geração; Térmico; Tensão	<i>Offline</i>	Permanente	[67]
Xiao	2021	Distribuição	P	Linearizado	Fluxo potência CC	Contingência N-1; Linha; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[62]
Avila	2021	Distribuição	PQ	Não Linear	Fluxo de potência trifásico	Contingência N-1; Linha; Tensão; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[63]
Tinoco	2021	Transmissao	PQ	Não Linear	Full Newton; Otimização por enxame de partículas	Contingência N-1; Gerador; Tensão, Térmico	<i>Offline</i>	Permanente	[65]
Li	2022	Distribuição	P	Linearizado	Interserção entre restrições de balanço	Contingência N-1; Linha; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[69]
Lima	2022	Distribuição	PQ	Não Linear	Fluxo de potência trifásico	Linha; Tensão; Transformador	<i>Offline</i>	Permanente	[70]
Maihemuti	2023	Transmissao	PQ	Não Linear	Fluxo de potência convencional; Otimização por enxame de partículas	Gerador; Linha; Tensão	<i>Offline</i>	Permanente	[75]

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, descreve-se como através da solução do fluxo de potência é possível construir a região de segurança. Tendo em vista a relevância do estudo do fluxo de potência para elaboração da SSR, foi feita uma descrição detalhada no Apêndice A sobre o processo de resolução do fluxo de potência trifásico utilizado pelo *software* OpenDSS, que será utilizado como motor de cálculo durante a construção da região de segurança. Nesse apêndice aborda-se todo o processo para resolução do fluxo de potência trifásico, detalhando o processo de construção da matriz de admitância, o cálculo das correntes de compensação, o de solução do sistema, denominado método do ponto fixo iterativo, e finalizando com um exemplo numérico. Consolidado o entendimento sobre o fluxo de potência trifásico, apresenta-se no atual capítulo o fluxograma que descreve os passos tradicionalmente utilizados para a construção da região de segurança, conforme descrito em [63]. Finalmente, apresenta-se a teoria referente à meta-heurística de enxame de partículas, que será integrada ao processo de construção da SSR, dando origem a metodologia proposta neste trabalho e que será detalhada no Capítulo 4.

#### 3.1 Método iterativo para construção da região de segurança

Nesta seção será descrito o processo de construção da região de segurança segundo a metodologia tradicionalmente encontrada literatura, tendo como referência a metodologia apresentada em [76], que detalha o processo para redes de transmissão de energia elétrica. Vale destacar que a SSR tem como objetivo avaliar a margem de segurança em relação a determinados parâmetros da rede e que podem ser levados ou não em consideração durante sua construção. Dessa forma, para um mesmo sistema, diferentes regiões seguras podem ser definidas, o que irá depender de quais grandezas e das áreas que serão monitoradas.

A determinação de um ponto de operação para um sistema é baseado, dentre outros fatores, pela condição de carga e geração dessa rede. Assim, para uma determinada condição de carga, diferentes condições de geração podem garantir o suprimento adequado, tendo maior ou menor margem de segurança em relação a certos limites de segurança. Levando em consideração que sistemas de transmissão de grande porte, em geral, apresentam um elevado conjunto de usinas geradoras de energia elétrica, avaliar a combinação de todos os possíveis pontos operativos torna-se uma tarefa infactível. Assim, uma estratégia utilizada para avaliar sistemas de potência sob determinada condição de carga consiste na divisão de todo o conjunto de usinas, em três grandes grupos de geração, que darão origem aos nomogramas de segurança, sejam reunidos, na visualização tridimensional, ou em suas projeções bidimensionais. Dessa forma, mantendo a condição de carga do sistema fixa, caso um dos grupos geradores altere sua potência injetada, os demais devem ajustar suas gerações de forma a manter o equilíbrio entre carga e geração. Destaca-se ainda que

um dos grupos deve ser utilizado como o grupo de referência, ou seja, para determinada condição de geração dos outros dois grupos, o grupo de referência será o responsável por garantir o balanço energético do sistema, restringindo portanto seu despacho como função dos outros dois grupos, que possuem liberdade de alterarem suas injeções livremente.

Dito isto, a construção da SSR pode ser estruturada em quatro etapas, descritas abaixo.

1. Divisão dos grupos geradores;
2. Definição das direções de busca e dos limites de segurança;
3. Definição das regiões exportadora e importadora
4. Definição dos fatores de participação

#### 3.1.1 Divisão dos grupos geradores

A divisão dos grupos geradores pode ser feita de diferentes formas desde que cada região tenha ao menos uma unidade geradora. Em geral, agrupa-se unidades geradores que possuam alguma característica em comum, como por exemplo, a fonte de geração de energia, ou seja, em determinado sistema, monitora-se um grupo formado apenas por geradores eólicos ou fotovoltaicos, a fim de visualizar os impactos da variação desta fonte de geração nos demais grupos. Outro critério que pode ser utilizado é a distância elétrica, de modo a agrupar usinas eletricamente próximas e separar usinas eletricamente distantes. Além disso, fatores geográficos também podem ser utilizados, a exemplo de usinas de uma mesma bacia hidrográfica.

Como destacado em [76], a escolha dos grupos geradores é importante, uma vez que se unidades geradores com sensibilidade opostas forem unidas em um mesmo grupo, a região gerada pode não trazer informações relevantes a respeito da operação da rede.

#### 3.1.2 Definição dos limites de segurança e das direções de busca

Para construir a região de segurança, inicialmente é necessário avaliar quais serão os limites avaliados, tendo em vista que, a depender dos critérios considerados a região formada será distinta. A seguir, estão alguns exemplos que podem ser utilizados para avaliar a segurança da rede ao nível de transmissão.

- Limite de tensão: Seja em redes de transmissão ou distribuição, existem faixas de tensões dentro das quais, a rede deve operar a fim de se garantir o funcionamento adequado dos equipados conectados a ela, estando portanto associada a critérios de qualidade de energia. Para redes de transmissão, os valores de referência da

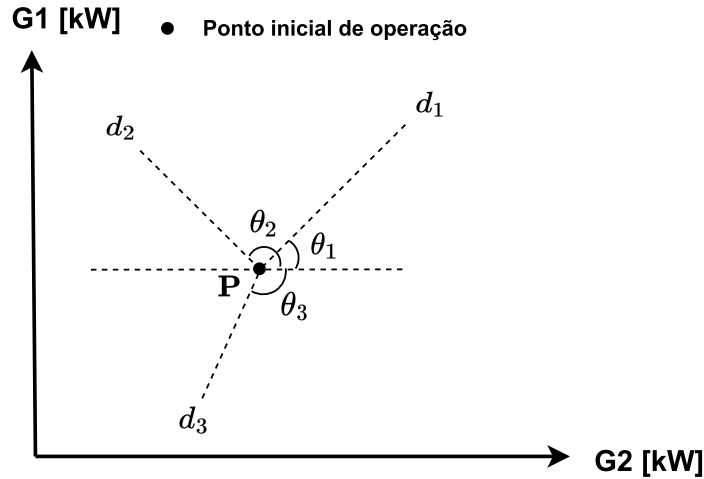
faixa de tensão são descritos pelos procedimentos de rede, elaborados pelo ONS [77], já para redes de distribuição essas referências se encontram no Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborados pela ANEEL [78].

- Limite térmico: Os equipamentos que compõem a rede possuem em suas especificações um carregamento máximo que assumem em condições de regime permanentes, bem como limites de carregamento, em geral superiores, para condições emergências de curta ou longa duração. Acima destes limites, tais equipamentos tem sua vida útil depreciada devido ao aquecimento a que são submetidos. Tal limite pode ser associado a corrente sobre tais equipamentos, a exemplo da corrente em linhas de transmissão, ou ainda à potência aparente sobre eles, a exemplo da potência aparente sobre transformadores.
- Limite de Mvar: As unidades geradoras possuem associados a elas, um limite máximo de potência reativa que podem operar, atrelado à curva de capacidade do equipamento, de modo que a potência reativa fornecida pelo mesmo deve ser sempre menor ou igual a tal limite.
- Limite de MW: De modo análogo ao limite de Mvar, as unidades de geração também apresentam uma capacidade máxima de geração de potência ativa, devendo portanto, a potência injetada ser limitada a tal valor.
- Limite de contingência: Limite associado a capacidade de continuar atendendo a demanda do sistema sem corte de carga, mediante a saída de um determinado equipamento relevante na rede, a exemplo de uma linha ou um transformador.
- Limite de convergência: Sendo o fluxo de potência um problema não linear cuja solução representa um ponto de operação atrelado a uma configuração de carga e geração da rede, e determinado pelo módulo e ângulo das correntes e tensões nodais, podem haver condições operativas, em que não exista uma configuração de ângulos e módulos das tensões e correntes neste sistema que satisfaçam essa condição, representando uma condição operativa sem solução, e portanto, divergente. Dessa forma, o limite de convergência, delimita as configurações em que o sistema não possui solução.

Definidas os critérios de segurança, a construção de SSR se dá a partir de um determinado ponto de operação da rede, a partir do qual sucessivas alterações nas potências dos geradores serão feitas, a fim de se encontrar os limites de segurança que serão violados. Deste modo, analisando o nomograma como da Figura 19, a partir do ponto inicial de operação  $P$ , diferentes direções podem ser investigadas, sendo o ângulo  $\theta$  o ângulo de

inclinação dessas direções em relação a uma direção de referência paralela ao eixo das abscissas.

Figura 19 – Direções de busca SSR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estratégia utilizada para construção da SSR consiste em incrementar as potências injetadas no ponto inicial de operação através de um passo fixo, que é devidamente ajustado entre os dois grupos presentes no nomograma de forma proporcional à direção de busca, até que algum dos limites de segurança seja violado. Feito esse procedimento para diferentes regiões, a união dos pontos mais afastados do ponto inicial de operação e que tenham respeitado os limites de segurança formam a região de segurança desse sistema.

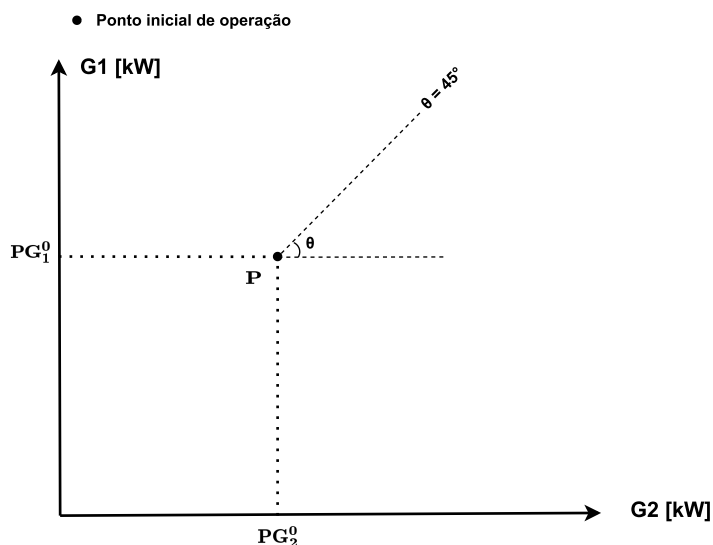
Para exemplificar, seja o ponto  $P$  da Figura 20 o ponto inicial de operação, definido por uma potência gerada pelo grupo 1 representada por  $PG_1^0$  e a potência do grupo 2, por  $PG_2^0$ . E a direção de busca a ser avaliada é aquela no ângulo de  $45^\circ$ .

Em seguida, define-se um passo de potência, que pode ser por exemplo, um percentual em relação a carga nominal do sistema, e que será utilizado para atualizar o valor de potência dos grupos 1 e 2. Esse passo de potência, pode ser observado na Figura 21, de forma tal que sua decomposição nos eixos das abscissas e ordenadas indicam o incremento de potência para os grupos G2 e G1, respectivamente. Feito isto, um novo ponto de operação destacado em amarelo torna-se o ponto a ser investigado, sendo definido pelas potências  $PG_1^1$  e  $PG_2^1$ .

Uma vez que o ponto de operação respeite todos os limites de segurança investigados, ele é classificado como um ponto seguro, sendo representado na cor verde, conforme indicado na Figura 22. E em seguida, um novo ponto de operação é definido a partir do mesmo passo de potência, definido pelas potências  $PG_1^2$  e  $PG_2^2$ , sendo investigado quanto a violação dos limites de segurança.

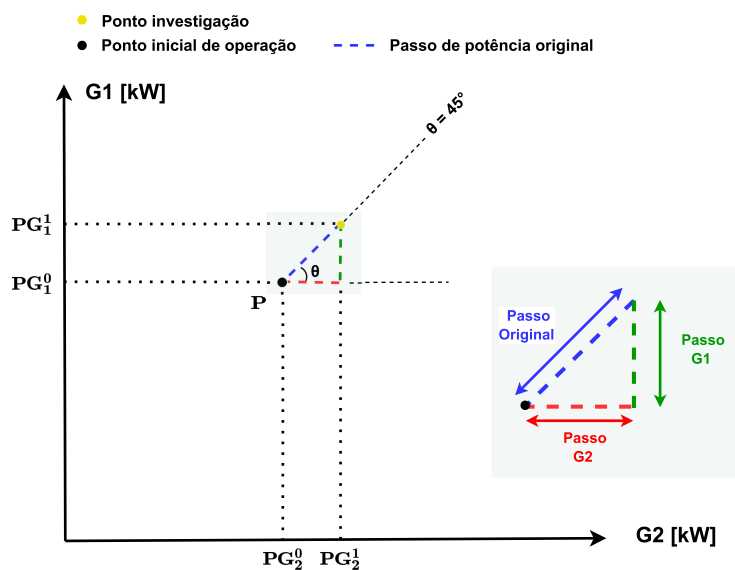
Nesta etapa, o ponto de operação investigado apresentou violação de algum limite

Figura 20 – Construção SSR Etapa Inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Construção SSR Etapa 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

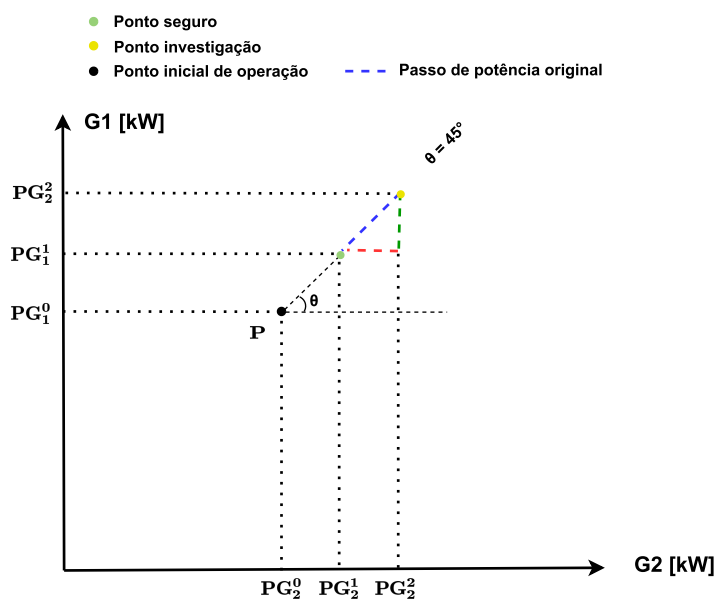
de segurança, sendo classificado como ponto inseguro e simbolizado na cor vermelha, conforme indicado na Figura 23. Nesta condição, reduz-se o passo de potência, que passa a ser representado na cor rosa, sendo reduzido na razão de 3 para 1 em relação ao passo original. Dessa forma, reduz-se os incrementos de potência nos eixos  $G1$  e  $G2$ .

Atualizado o novo passo de potência, retorna-se ao ponto de operação seguro imediatamente anterior, nesse caso, o ponto definido pelas coordenadas  $PG_1^1$  e  $PG_2^1$ , e retoma-se o processo de incremento de potência, conforme indicado na Figura 24.

Respeitando os critérios de segurança investigados, o ponto de operação definido

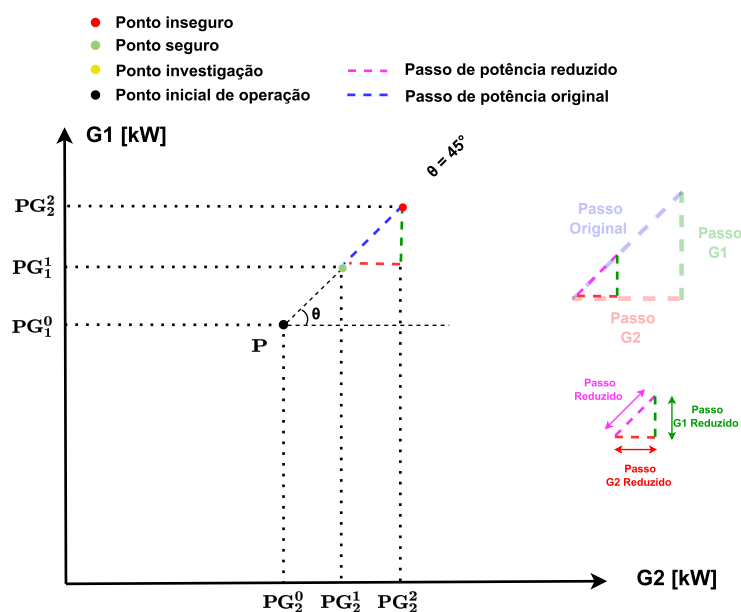


Figura 22 – Construção SSR Etapa 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Construção SSR Etapa 3.

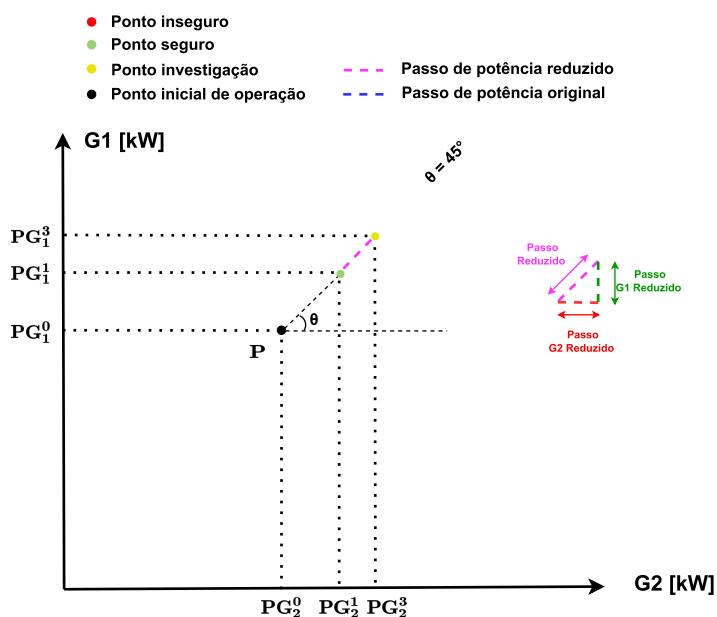


Fonte: Elaborado pelo autor.

pelas potências  $PG_1^3$  e  $PG_2^3$  é classificado como seguro, e continua-se o processo de incremento de potência, conforme representado na Figura 25.

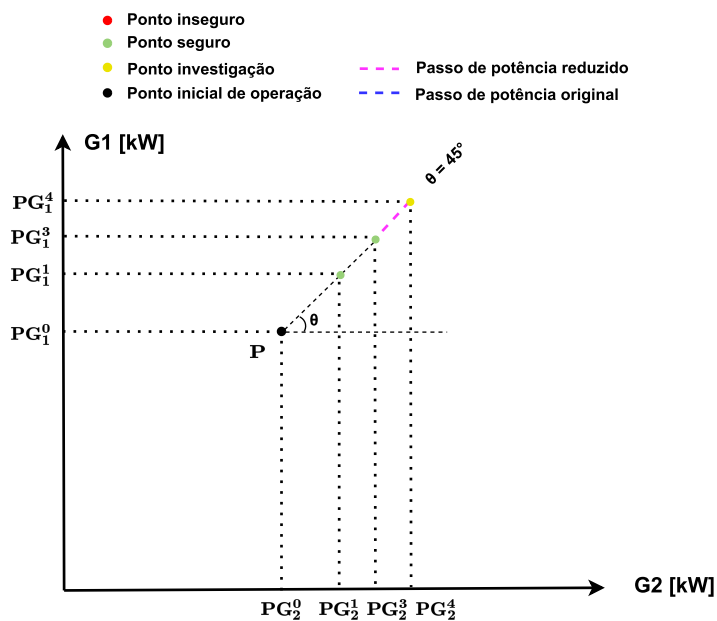
Como o novo ponto de operação ( $PG_1^4$ ,  $PG_2^4$ ) viola algum dos limites de segurança, ele é classificado como inseguro, e novamente reduz-se o passo de potência. Porém, neste caso, o novo passo encontrado é inferior ao passo mínimo de potência definido, de tal forma que encerra-se o processo de busca naquela região e o último ponto seguro marca o

Figura 24 – Construção SSR Etapa 4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Construção SSR Etapa 5.

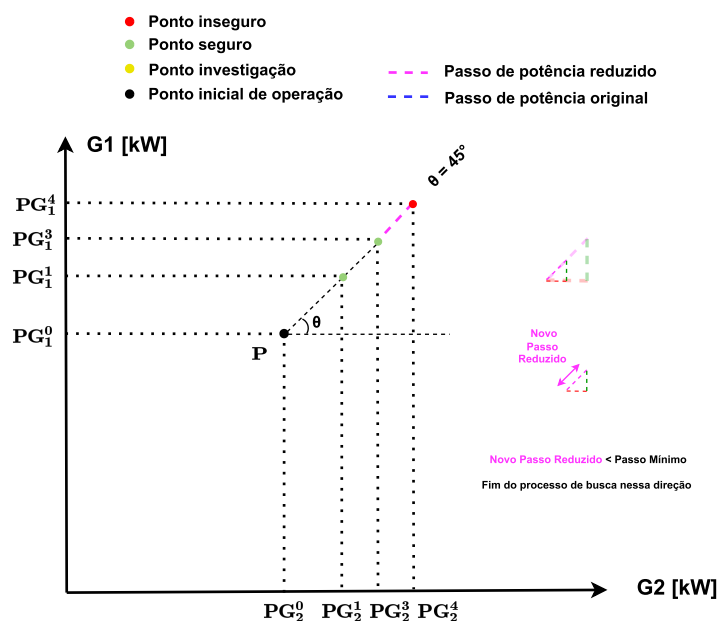


Fonte: Elaborado pelo autor.

limite da região de segurança para a direção de  $45^\circ$ , representado na Figura 26.

Finalizado o processo de busca em uma determinada região, repete-se o processo em todas as demais direções de busca. Supondo um exemplo em que sejam investigados 8 direções de busca. O limite da região de segurança será obtido ao interligar os pontos seguros mais distantes em relação ao ponto inicial de operação para cada direção, conforme

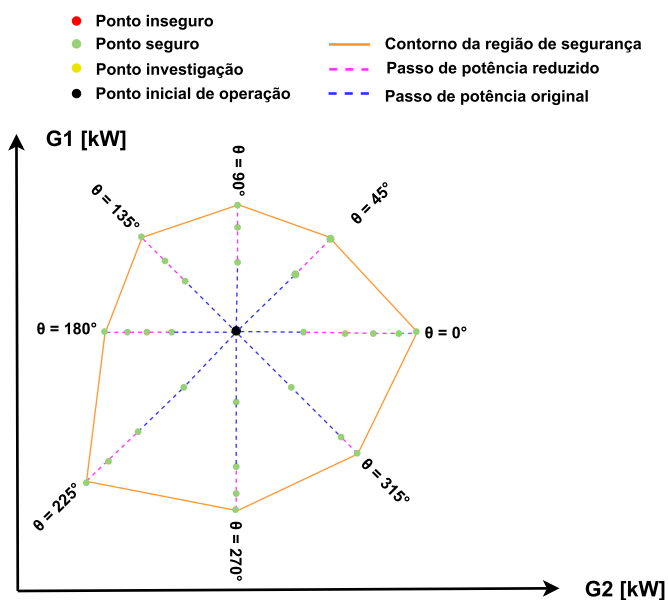
Figura 26 – Construção SSR Etapa 6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

indicado na Figura 27.

Figura 27 – Construção SSR Etapa Final.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Fluxograma da Figura 28 resume todas as etapas mencionadas durante a construção da região de segurança. Sendo  $ND$ , o número de direções de busca, e  $i$  o índice referente a posição da direção de busca na lista contendo todas as direções a serem avaliadas, os ângulos referentes a essas direções são definidos conforme as Equações (3.1) e (3.2),

de modo que a diferença entre dois ângulos de busca consecutivos seja sempre a mesma ao redor de toda a região de busca.

$$\theta = \theta_0 + i \cdot \alpha \quad (3.1)$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{ND} \quad (3.2)$$

### 3.1.3 Definição das regiões exportadora e importadora

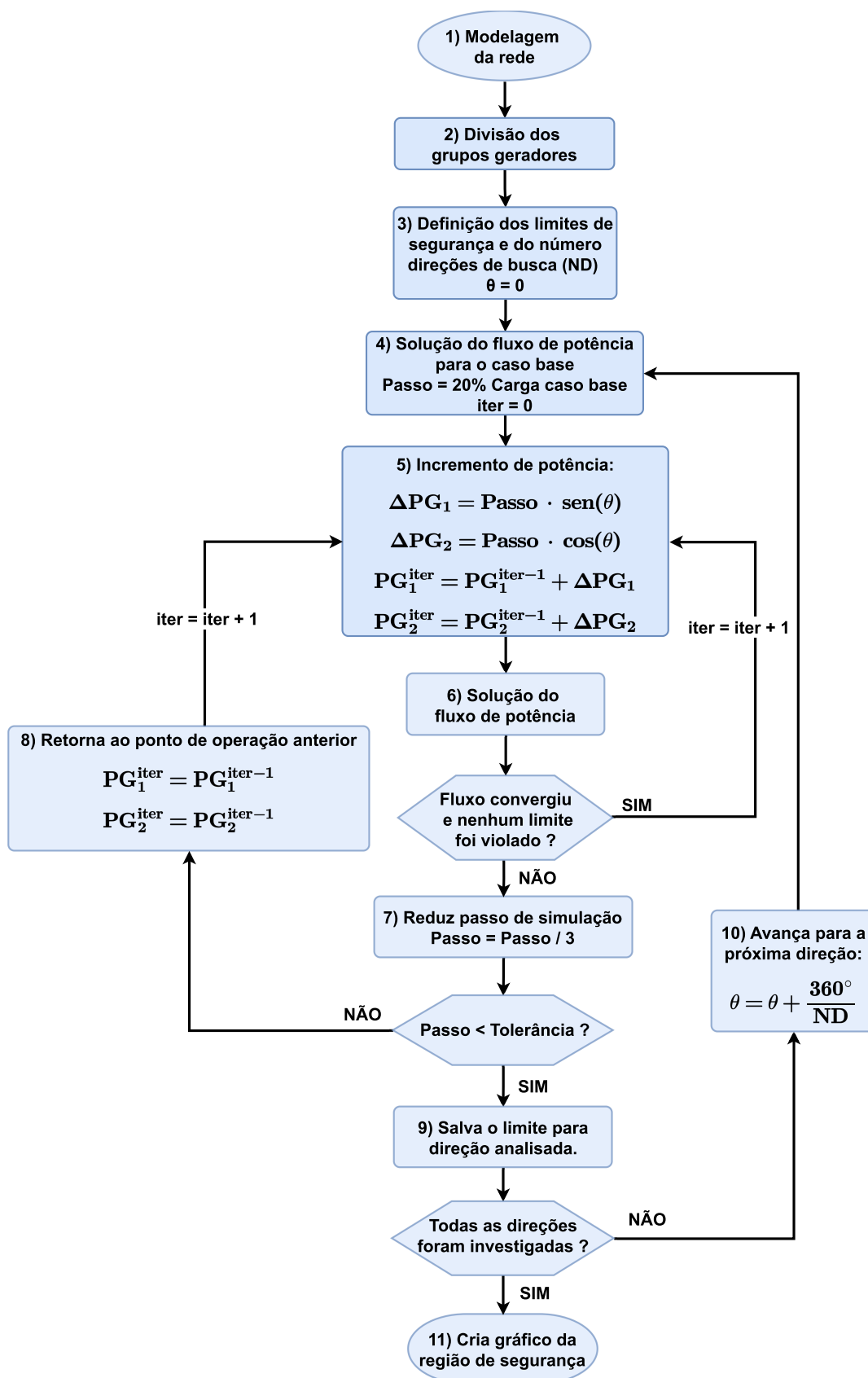
Ao longo do processo iterativo de construção da SSR, deve-se atentar para os limites de exportação e importação de cada um dos grupos de geração definidos, tendo em vista que esses valores são limitados seja pelas próprias unidades geradores, seja pela capacidade de escoamento da rede. Assim, supondo um cenário com três grupos geradores, G1, G2 e G3, e considerando o G3 como o grupo de referência, é possível, para cada direção de busca, aqui definida pelo ângulo  $\theta$ , entender a contribuição de cada grupo mediante o processo iterativo, seja injetando uma maior potência pelas unidades geradores, e portanto, atuando como região exportadora (REXP), seja reduzindo a geração das usinas, e portanto atuando como importadora (RIMP). Ou ainda, em determinadas condições, um grupo pode não sofrer alteração em suas usinas, sendo todo o desvio gerador por um grupo absorvido por outro. A Tabela 3 detalha os possíveis cenários de exportação e importação, considerando um nomograma análogo ao da Figura 19 em que o eixo das abcissas é referente ao grupo G2, o eixo das ordenadas, ao grupo G1, e o G3 referente ao grupo de referência. De acordo com a configuração de cada grupo exportador e importador, deve-se garantir que os limites de cada grupo sejam respeitados.

### 3.1.4 Definição dos fatores de participação

Sendo a SSR analisada sob o ponto de vista de três grupos de geração, é bem possível que diferentes unidades geradores sejam englobadas em um mesmo grupo, conforme os critérios definidos na Seção 3.1.1. Nesse contexto, as variações de geração definidas na Tabela 3 podem ser distribuídas de diferentes formas entre as unidades geradoras, de modo ainda que algumas unidades sequer participem dessa variação de potência. Um exemplo análogo a esse seria a distribuição de potência entre geradores que compõem o controle automático de geração, de forma proporcional ao estatismo das máquinas [80]. Por mais que, neste exemplo em questão, os critérios que definem essa variação do fator de participação não necessariamente precisem estar associados às características físicas de cada usina, a comparação pode ser de ajuda no entendimento desse conceito.

Alguns exemplos de fatores que podem determinar a participação das usinas dentro de um grupo, seria a própria capacidade nominal das máquinas, o estado inicial de operação dessa máquina, tendo em vista que dois geradores com capacidades nominais iguais podem

Figura 28 – Fluxograma construção SSR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Cenários de intercâmbio entre grupos geradores.

Quadrante	Ângulo	REXP	RIMP
1°	$0 < \theta < 90^\circ$	G1 + G2	G3
2°	$90^\circ < \theta < 135^\circ$	G1	G2 + G3
	$\theta = 135^\circ$	G1	G2
	$135^\circ < \theta < 180^\circ$	G1 + G3	G2
3°	$180^\circ < \theta < 270^\circ$	G3	G1 + G2
4°	$270^\circ < \theta < 315^\circ$	G2 + G3	G1
	$\theta = 315^\circ$	G2	G1
	$315^\circ < \theta < 360^\circ$	G2	G1 + G3
-	$\theta = 0^\circ$	G2	G3
-	$\theta = 90^\circ$	G1	G3
-	$\theta = 180^\circ$	G3	G2
-	$\theta = 270^\circ$	G3	G1

Fonte: Extraído de [79].

estar operando inicialmente com injeções de potência distintas, de tal modo que o gerador com a menor geração inicial teria uma maior margem para incremento de em sua geração, ou ainda, questões associadas à inflexibilidade de usinas, tendo em vista que determinadas usinas, devido ao processo de geração, possuem uma potência mínima para operar, de tal forma que não podem operar em patamares inferiores.

### 3.2 Otimização por enxame de partículas

O método de otimização por enxame de partículas foi desenvolvido na década de 1990 [66] para resolução de problemas não lineares. O método, foi inspirado no comportamento de revoada de pássaros em busca de comida. Observou-se que ao se deslocarem em busca de comida, os pássaros apresentavam um movimento síncrono, mantendo uma distância ótima entre os indivíduos do grupo. Percebeu-se então que havia ali um interação social, em que a melhor posição, que seria a posição mais próxima a fonte de comida, era um conhecimento compartilhado entre os indivíduos, de modo que cada um corrigia sua posição ao redor deste melhor ponto. Além disso, cada indivíduo também era influenciado pela memória de sua própria melhor posição, definido como uma característica cognitivo própria do indivíduo, de modo então que o movimento dos pássaros seria dado em função dessas duas grandezas. Posteriormente, essa metodologia foi desenvolvida em outros trabalhos introduzindo fatores como inércia associada ao movimento dos pássaros por exemplo [81, 82, 83, 84].

Como referência utilizada para este trabalho, foi utilizada a metodologia descrita em

[65], na qual a atualização da velocidade dos indivíduos durante o processo de otimização passa a ser descrita por três elementos, seu comportamento social, sua cognição e por sua inércia. As Equações (3.3), (3.4) e (3.5), descrevem a forma como a velocidade e posição dos pássaros são atualizadas ao longo das iterações.

$$v_i^{iter} = w \cdot v_i^{iter-1} + c_1 \cdot rand_1(pbest_i - s_i^{iter-1}) + c_2 \cdot rand_2(gbest - s_i^{iter-1}) \quad (3.3)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (3.4)$$

$$s_i^{iter} = s_i^{iter-1} + v_i^{iter} \quad (3.5)$$

Considerando os pássaros de de um bando como partículas, tem-se que a inércia dessas partículas, representada por  $w$ , é a tendência das mesmas preservarem a velocidade da iteração anterior. Dessa forma, um elevado valor de inércia indica que a atualização da velocidade das partículas tem maior dependência de sua condição anterior, do que de fatores como iteração social e capacidade cognitiva, enquanto que um baixo valor de inércia, torna a atualização da velocidade mais dependente de fatores sociais e cognitivos do que de sua condição prévia de movimento.

Em [65] utiliza-se valor de inércia que decai linearmente ao longo das iterações, partindo de um valor máximo  $w_{max}$  até um valor mínimo  $w_{min}$  (cujas referências na literatura variam de 1,5 a 0,4, respectivamente), vide Equação (3.4), fazendo com que os comportamentos sociais e cognitivos sejam gradativamente mais priorizados ao longo das iterações, tendo em vista que a medida que o tempo passa, os indivíduos estão mais próximos do seu alvo, e portanto, maior a importância do compartilhamento deste conhecimento. Ainda nesta equação, tem-se que  $iter$  é o número da iteração atual e  $iter_{max}$ , o número máximo de iterações que define o critério de parada do método.

Definida a inércia da partícula, tem-se que o primeiro termo da Equação (3.3) que define a atualização da velocidade da partícula  $i$  na iteração atual  $iter$  ( $v_i^{iter}$ ), é conhecido, sendo, portanto, igual à sua inércia multiplicada pela velocidade desta partícula na iteração anterior ( $v_i^{iter-1}$ ). Na sequência os outros dois termos da equação, referem-se ao comportamento social e cognitivo da partícula, sendo ponderados, respectivamente, pelos coeficientes de aceleração  $c_1$  e  $c_2$ , cujos valores de referência na literatura são da ordem de 2 para ambos os coeficientes. Além dos coeficientes de aceleração, tais termos são ponderados por fatores randômicos entre 0 e 1 ( $rand_1$  e  $rand_2$ ), a fim de caracterizar uma determinada condição de aleatoriedade do movimento, permitindo que as partículas explorem novas posições.

O termo  $pbest_i$  indica a melhor posição obtida pelo próprio indivíduo ao longo de todo o processo iterativo, estando portanto, associado à sua característica cognitiva, sendo a melhor posição, aquela de maior aptidão e maior proximidade com o alvo perseguido.

Já o termo  $gbest_i$  indica a melhor posição, ou posição de maior aptidão, perante todos os indivíduos do grupo, de tal forma que através da iteração social, influencia-se os demais indivíduos a se aproximarem desta posição.

Definidos todos os termos da Equação (3.3), tem-se que a velocidade da partícula ( $v_i^{iter}$ ) está definida. Diante disso, a posição da partícula na iteração atual,  $s_i^{iter}$  passa a ser representada pela soma da posição da partícula na iteração anterior  $s_i^{iter-1}$  com a velocidade na iteração atual, conforme representado em (3.5).

### 3.3 Considerações parciais

Neste capítulo é possível observar a riqueza de informações que a região de segurança pode fornecer acerca da operação do sistema, acusando condições inseguras de operação sob diferentes aspectos, a exemplo de limites térmicos de equipamentos, amplitude de tensão, dentre outros. Tal riqueza de informações, entretanto, se concentra nos estudos associados a sistemas de transmissão, ao passo que, de modo geral, em sistemas de distribuição o número de informações e limites avaliados quanto à operação segura da rede tendem a ser reduzidos, sendo um ponto de melhoria para as formulações voltadas para esse tipo de rede.

Quando avaliado o método iterativo de construção da região de segurança descrito neste capítulo, é notório que o esforço computacional necessário para construção da região de segurança, bem como o tempo demandado, será maior quanto maior a resolução da área segura solicitada pelo usuário, que por sua vez, pode ser interpretada como um maior número de direções de busca. Também é possível observar que o limite de segurança em uma direção é independente das demais direções, estabelecendo uma condição adequada para que diferentes direções de busca possam ser analisadas de forma simultânea. Assim, observa-se um cenário propício ao uso de processamento paralelo, mediante um processo que necessita de agilidade e que contém atividades que podem ser processadas simultaneamente.

Além disso, é possível questionar se a escolha de um passo fixo de variação de potência ao longo do método iterativo é de fato a melhor e mais eficiente proposição para o processo em questão. Sendo tal característica, potencial candidata à aplicação de um método de otimização que defina o melhor passo a ser utilizado ao longo das iterações. Destacando-se nesse contexto, o método de otimização por enxame de partículas, por apresentar uma implementação simplificada e eficiente para esse tipo de problema.



## 4 METODOLOGIAS PROPOSTAS

A metodologia proposta neste trabalho consiste em adaptar a metodologia tradicional de construção da SSR, inserindo a meta-heurística de otimização por enxame de partículas no processo iterativo a fim de agilizar a etapa de incremento de potência no ponto de operação. Por representar a rede de forma completa, em sua condição trifásica e desequilibrada, a região de segurança gerada após a aplicação do método que envolve a solução do fluxo de potência trifásico, a qualidade dessa região tende a ser superior aos modelos que tratam a representação simplificada da rede, ou que geram os limites da SSR baseado exclusivamente nas equações de balanço do sistema, ainda que sejam gerados de forma ágil.

Com isso, tal metodologia distingue-se das demais literaturas por realizar a construção da região de segurança para sistemas de distribuição através da execução de sucessivos fluxos de potência que representam a rede de forma detalhada, sem linearizações e utilizando uma meta-heurística que visa melhorar a rigidez existente no processo tradicional de construção da SSR, onde o passo de variação de potência para uma determinada direção, se mantém fixo, ou seja, mantém uma mesma proporção na variação de potência entre os eixos do nomograma. Para o desenvolvimento da metodologia proposta, foi necessário o desenvolvimento de uma rotina em linguagem *Python* responsável por seguir o algoritmo de construção da SSR e interagir com o *software* OpenDSS, responsável pela execução do fluxo de potência.

Inicialmente, apresenta-se a construção da região de segurança seguindo uma metodologia tal qual descrita na seção 3.1, utilizando um passo fixo de potência, mas devidamente adaptada para sistemas de distribuição, que para fins de referência neste trabalho será tratada como metodologia tradicional, e na sequência propõe-se a utilização da técnica de otimização por enxame de partículas para garantir um passo variável ao longo das iterações, de tal forma que as partículas tenham liberdade para alterar suas velocidades e posições durante a construção da região de segurança, denominada metodologia PSO.

Conforme será visto, o processo de construção da SSR é um processo bastante custoso computacionalmente, de modo que será proposta também, uma forma de paralelização durante sua construção, a fim de reduzir o tempo computacional demandado para tal atividade. Tal paralelização será aplicada tanto à metodologia tradicional, quanto à metodologia PSO.

### 4.1 Diferença entre SSR para transmissão e para distribuição

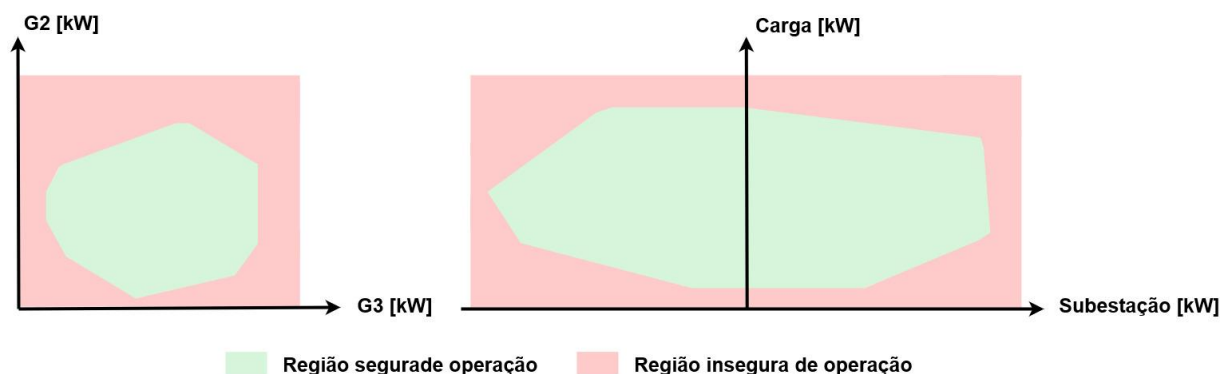
Pela revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, chama-se atenção para o fato de que os primeiros estudos sobre região de segurança, desenvolvidos para sistemas de transmissão, ocorreram na década de 1980, enquanto que análises semelhantes em sistemas

de distribuição só seriam desenvolvidas cerca de 3 décadas a frente, na década de 2010, sendo, portanto, um indício de que tais sistemas possuem diferenças significativas. Uma das principais diferenças entre esses sistemas reside na representação da própria rede, que para sistemas de transmissão é representada em sua forma monofásica equivalente, em razão do relativo equilíbrio entre fases, ao passo que, em sistemas de distribuição, a representação trifásica é imprescindível dado o grau de desequilíbrio entre as fases e à própria topologia dos alimentadores.

Soma-se a isso a diferença construtiva das próprias redes e aos efeitos físicos que isso acarreta, a exemplo do comprimento das redes de transmissão, que devido a sua elevada extensão apresentam características capacitivas em determinadas condições de carregamento, e que, de forma geral, não são observadas em alimentadores de distribuição, caracterizados por uma curta extensão e com uma relação entre resistência e reatância das linhas superiores às linhas de transmissão. Tal fato, faz com que premissas e métodos utilizados para solução do fluxo de potência sejam específicos para cada um desses sistemas.

Tais características mencionadas distinguem, de modo geral, as análises voltadas para sistemas de transmissão e sistemas de distribuição. Porém, quando se trata de região de segurança, outro aspecto passa a ser relevante para diferenciar esses dois sistemas, estando relacionado a escolha dos grupos de geração. Conforme apresentado na seção 3.1.1, os grupos de geração que definem os eixos da região de segurança em sistemas de transmissão são formados por conjuntos de uma ou mais unidades geradoras que possuam características em comum, a exemplo de fontes de geração ou mesmo bacias hidrográficas. Ou seja, necessariamente todos os eixos precisam ser definidos por grupos que contenham unidades geradoras, sendo que a escolha do grupo de referência deve ser tal que não influencie na análise dos demais grupos. Entretanto, quando se trata de sistemas de distribuição, a escolha dos grupos que compõem os eixos dos nomogramas passa a ser outra além de grupos geradores, de modo a agrupar conjuntos de barras cuja configuração final agregue alguma informação relevante a respeito da operação da rede. Dessa forma, a formulação utilizada para os eixos da região de segurança em sistemas de distribuição inclui a geração distribuída na rede (também referenciado por RED), a carga do sistema e a potência que flui pela subestação, vide Figura 5. Sendo neste caso, a subestação como o grupo de referência. Dessa forma, é possível extrair informações de como os impactos na carga, a exemplo de alterações como inserção de veículos elétricos ou resposta a demanda, afetam a região segura de operação, bem como a alta penetração de gerações distribuídas, conforme discutido no Capítulo 1. Um reflexo imediato dessa escolha, e que difere a SSR formada para sistemas de transmissão em relação aos sistemas de distribuição é que um dos eixos da região de segurança, no caso a potência da subestação, pode assumir valores negativos, em decorrência do fluxo bidirecional presente nessas redes, enquanto que para sistemas de transmissão todos os eixos admitem apenas valores positivos, conforme indicado na Figura 29.

Figura 29 – Diferença entre SSR para transmissão e distribuição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

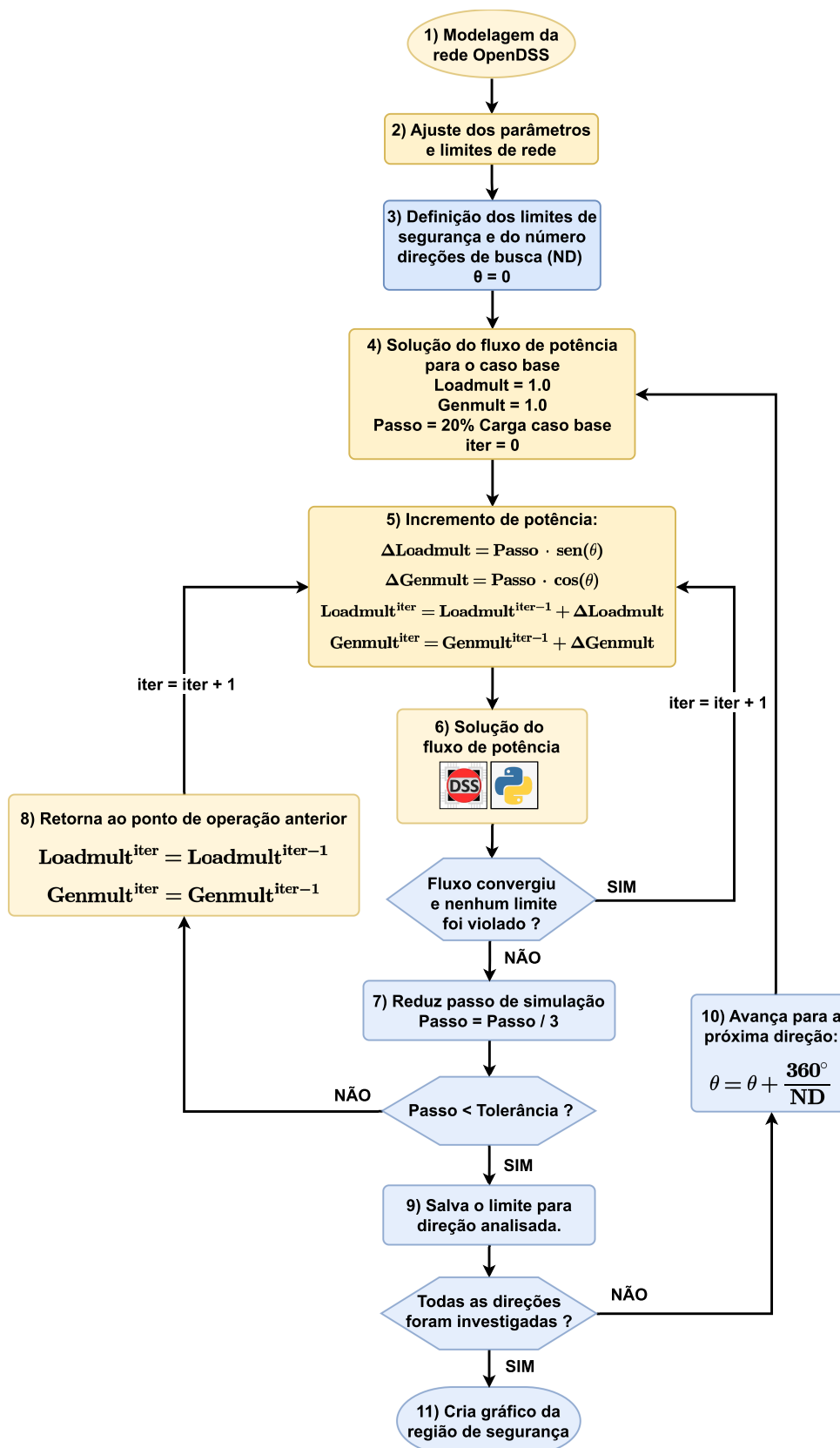
## 4.2 Metodologia tradicional

A construção da SSR pela metodologia tradicional se assemelha à metodologia descrita na seção 3.1, sendo representado no Fluxograma da Figura 30. Destaca-se em amarelo as etapas que diferem em algum ponto do Fluxograma da Figura 28.

Assim, detalhando as etapas do fluxograma, na Etapa 1 é feita a modelagem da rede no OpenDSS, onde é possível especificar, em detalhes, as características de cada equipamento que compõe a rede de distribuição, inserindo informações como potência do equipamento, nível tensão, fator de potência, tipo de conexão, geometria dos condutores (no caso de linhas), matriz de impedâncias, capacidade em condição normal e emergência, dentre outros. Na Etapa 2, configura-se os parâmetros referente ao método iterativo, definindo o passo mínimo para a convergência do método, e também parâmetros associados a convergência do fluxo de potência no OpenDSS. Ainda nesta etapa, consulta-se o PRODIST para avaliar os valores de referência que devem ser respeitados para garantir a qualidade do fornecimento de energia [78], de onde será obtida a faixa de referência de tensão para operação do sistema. A Etapa 3, se mantém a mesma do fluxograma anterior, nesta etapa define-se o número de direções de busca e inicializa-se o ângulo de busca no valor de referência. Também nesta etapa, define-se os limites que serão avaliados para a construção da SSR. Neste trabalho serão avaliados os limites térmicos, que serão representados pelo carregamento das linhas e potência aparente de transformadores, limite de tensão do sistema, estando diretamente relacionado à faixa de tensão adequada obtida no PRODIST, e o limite de convergência do fluxo de potência.

Em seguida, na Etapa 4, executa-se o fluxo de potência para o caso base, que é caracterizado pela manutenção da carga e da geração do sistema em seus valores nominais, o que pode ser identificado pelos fatores multiplicadores da carga e geração no valor unitário (*Loadmult* e *Genmult*, respectivamente). Tais fatores são aplicados sobre cada um

Figura 30 – Fluxograma metodologia tradicional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

dos equipamentos da rede, alterando sua potência de forma proporcional ao fator definido, ou seja, caso o fator *loadmult* seja de 1,5, todas as cargas teriam sua potência elevada de 50% em relação ao seu valor nominal. Ainda nesta etapa, define-se o incremento de potência inicial, que será referenciado por passo inicial, para inicialização do método, como sendo 20% da carga do sistema. O valor passo foi escolhido de forma empírica, mas sua inicialização influencia diretamente na convergência do método.

A Etapa 5, marca o início do processo iterativo de construção da região, definindo a iteração inicial do processo (*iter* = 0). A partir do passo definido na Etapa 4, as variações de potência para carga e geração serão definidas através da projeção desse valor, nos eixos cartesianos que compõem o nomograma, definindo a variação de potência na carga e geração, representados por  $\Delta Loadmult$  e  $\Delta Genmult$ , respectivamente. Destaca-se que um passo elevado pode fazer com que o fluxo de potência enfrente problemas de convergência logo nas primeiras iterações, enquanto que um passo reduzido pode resultar em um número elevado de iterações para convergência do método. Já o passo mínimo para a convergência estará diretamente associado à qualidade da fronteira da região segura, ou seja, valores elevados para o passo mínimo, podem ocultar a verdadeira margem de segurança do sistema em virtude de uma convergência antecipada do método, enquanto que valores reduzidos geram regiões mais precisas, porém sob o custo de um maior esforço computacional.

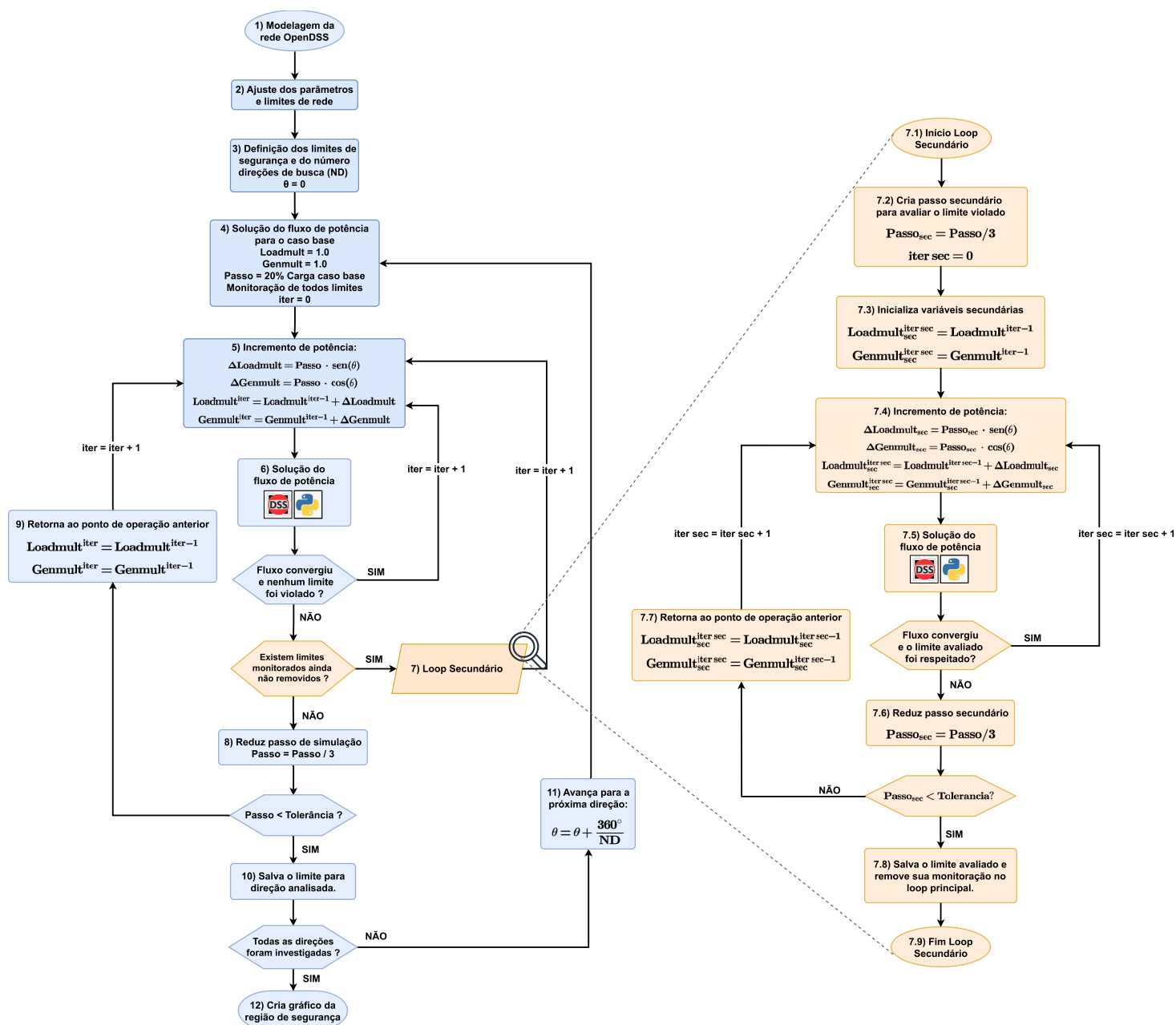
Feitos os ajustes de carga e geração, executa-se o fluxo de potência utilizando a integração entre Python e OpenDSS na Etapa 6. Em seguida, verifica-se se o fluxo de convergiu sem que nenhum limite tenha sido violado. Em caso positivo, retorna-se à Etapa 5 e realiza-se um novo incremento de potência. Já em caso negativo, avança-se para a Etapa 7, onde será feito a redução do passo de potência a um terço do passo anterior (valor obtido empiricamente). Caso o novo passo seja superior ao passo mínimo de potência, também designado, tolerância do método, significa que o método iterativo deve continuar. Para este trabalho foi utilizado como passo mínimo de potência um valor referente a 0,5% da carga do sistema. Assim, retoma-se o ponto seguro imediatamente anterior, porém com o passo atualizado (Etapa 8), e retoma-se o processo de atualização do ponto de operação (Etapa 5). Porém, caso o novo passo seja inferior ao valor de tolerância, significa que o critério de parada do método foi atingido, e o processo iterativo na direção atual pode ser encerrado. Assim, na Etapa 9, salva-se o limite da região segurança para tal direção, e avalia-se se todas as direções de busca já foram percorridas. Em caso negativo, atualiza-se o ângulo que define a direção de busca na Etapa 10, e reinicia-se todo o processo de incremento de potência, desde o caso base, ou seja, retorna-se à Etapa 4. Finalmente, caso todas as direções de busca já tenham sido percorridas, interligam-se os pontos seguros definidos no limite de cada direção, e constrói-se a região de segurança na Etapa 11, finalizando o processo.

Ao final do processo em questão, tem-se a área que define a região segura de operação, que apesar de não ser avaliada em tempo real, serve como insumo para que o operador do sistema da distribuição possa avaliar a margem de segurança para uma determinada configuração de carga e geração. Entretanto, quando se avalia apenas a região segura, não é possível saber qual o fator limitante da rede, uma vez que qualquer um dos limites pode ter sido violado. Dessa forma, é interessante também determinar os limites de segurança para cada uma das grandezas monitoradas, tal como na Figura 5, sendo possível orientar o operador qual o fator limitante da rede, a fim de tomar ações que possam ampliar a margem de segurança, a exemplo de transferência de carga entre alimentadores, ou ainda o chaveamento de um banco de capacitores para ajuste de tensão. Tal limite pode ser construído de forma análoga ao processo descrito no Fluxograma da Figura 30, porém considerando apenas um único limite de segurança para as Etapas 3 e 7. Entretanto, tal proposição pode desencadear um esforço computacional elevado, tendo em vista que a região segura seria percorrida sucessivas vezes. Desse modo, neste trabalho foram construídos os limites para cada uma das grandezas monitoradas, adaptando o fluxograma conforme indicado na Figura 31, de modo que ao atingir um ponto de operação em que uma determinada grandeza monitorada tenha seu limite violado, inicia-se um *loop* secundário, a partir do qual apenas tal grandeza será monitorada, a fim de refinar a margem de segurança para a mesma.

Destaca-se em laranja na Figura 31, as etapas que diferem do fluxograma da Figura 30. Basicamente, todo o processo iterativo inicial é preservado, e insere-se uma nova condicional após a Etapa 6 e um segundo processo iterativo, na Etapa 7, dentro do *loop* principal, que será responsável por determinar a margem de segurança de cada grandeza monitorada. Assim, até a Etapa 6, o processo de incremento de potência se mantém o mesmo, porém quando alguma das grandezas monitoradas é violada, inicia-se o *loop* secundário, que corresponde às Etapas de 7.1 a 7.9. A Etapa 7.1 marca o início do método iterativo referente à grandeza que foi violada, ou seja, caso tenha ocorrido uma violação de tensão na condicional avaliada após a Etapa 6, este *loop* secundário será responsável por determinar o incremento máximo de potência para aquela direção de busca em que o limite de tensão se mantenha seguro. E da mesma forma é feito para os limites de corrente nas linhas e potência aparente dos transformadores, até que todos os limites, com exceção do limite de convergência do fluxo de potência, tenham sido traçados (condição verificada antes de iniciar o *loop* secundário).

Para estressar apenas o limite violado, na Etapa 7.2, utiliza-se um passo secundário e independente do passo original, de tal forma que, após encontrar o limite da grandeza em estudo, retoma-se o passo original no *loop* principal, evitando que o processo tenha um esforço computacional excessivo e desnecessário caso mantivesse o passo secundário para avaliar todos os limites. Em seguida, inicializa-se as variáveis referentes aos acréscimos de potência, *Loadmult* e *Genumlt*, em seus valores prévios à violação da grandeza em

Figura 31 – Fluxograma metodologia tradicional avaliando todos limites.



Fonte: Elaborado pelo autor.

estudo. Em 7.4, definem-se também novos incrementos de potência e de carga que também independem do *loop* principal, que por conta disso recebem o subíndice *sec*, bem como a numeração das iterações em um novo índice.

Na sequência executa-se o fluxo de potência na Etapa 7.5 tal como é feito na Etapa 6, e avalia-se se a grandeza monitorada teve seu limite violado ou não, destacando aqui que apenas a grandeza monitorada é avaliada e não todos os limites. Caso tal grandeza não seja violada sob o novo passo, retorna-se à Etapa 7.4 e atualiza-se os incrementos de potência. Porém, caso ocorra a violação, reduz-se o passo na Etapa 7.6, até que ele seja

inferior a uma determinada tolerância e retoma-se o ponto de operação imediatamente anterior (Etapa 7.7), sendo estas etapas idênticas ao *loop* principal.

Por fim, ao atingir a tolerância mínima do passo secundário, tem-se que a grandeza monitorada (tensão nas barras, corrente nas linhas ou potência aparente dos transformadores) já tem sua margem calculada, de forma que ela não precisa ser mais avaliada e deve ser removida da monitoração no *loop* principal, processo que é feito na Etapa 7.8. E assim, encerra-se o processo iterativo secundário na Etapa 7.9, que será seguida pela Etapa 8, no processo iterativo original. Daí em diante todas as Etapas são as mesmas, apenas com a consideração que, ao avançar para uma nova direção, após a Etapa 11, deve-se retomar o monitoramento de todas as grandezas na Etapa 4, uma vez que a margem construída no *loop* secundário é referente apenas a uma direção de busca.

Ao final do processo descrito, tem-se além da definição da região segura, um maior detalhamento sobre a margem referente a cada uma das grandezas monitoradas, permitindo uma melhor compreensão sobre o ponto de operação do sistema, e quais medidas operativas tendem a afastar esse ponto de operação do limite de segurança e otimizar a margem da rede.

### 4.3 Metodologia PSO

Considerando que a construção da SSR pode se interpretada como um problema de otimização, cujo objetivo é maximizar a distância de um possível ponto de operação em relação a um determinado ponto de operação inicial sem violar nenhum dos limites monitorados, a ideia de se utilizar o método de enxame por partículas para resolução do problema de otimização da margem de segurança surge como uma formulação alternativa à metodologia principal. Assim, características rígidas da metodologia tradicional referentes à definição de um passo fixo de potência e direções pré determinadas de busca, dão lugar a um cenário mais flexível, no qual os novos pontos de operação, associados às partículas do método PSO, possuem liberdade para definirem tanto a trajetória quanto seu incremento de potência ao longo das iterações, baseado nas características do método, descritas na Seção 3.2.

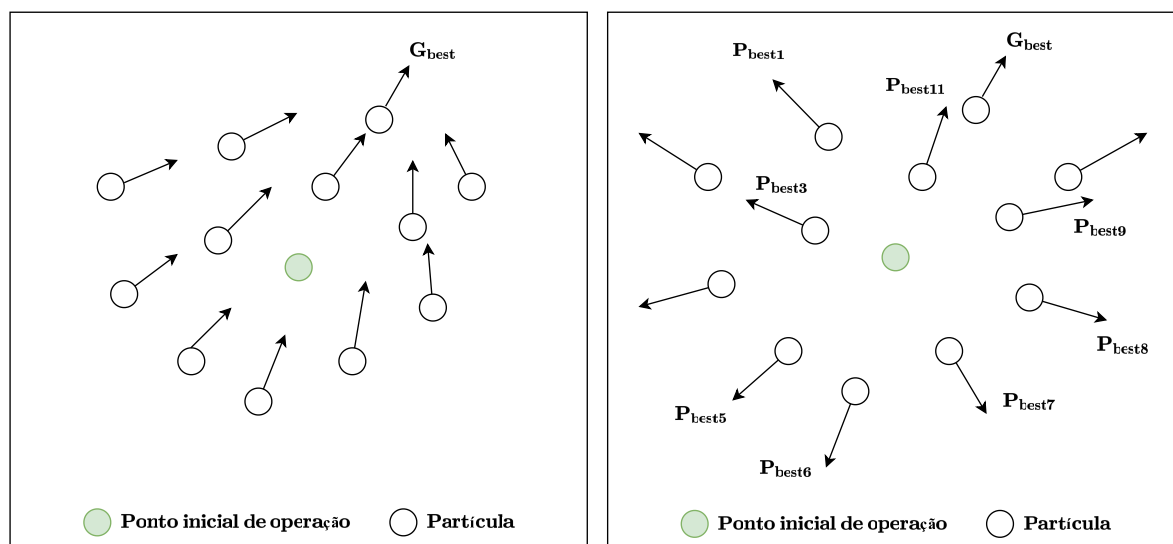
Nesse cenário, cada partícula faz referência a um determinado ponto de operação a ser investigado, sendo o objetivo do método, encontrar a máxima variação de potência, seja de carga, seja de geração, ou ambos, em relação ao ponto inicial de operação, no qual o sistema consegue respeitar os limites de todas as grandezas monitoradas. Assim, ao distribuir uma série de partículas ao redor do ponto inicial de operação, espera-se que cada partícula encontre um ponto de operação suficientemente distante do ponto inicial, de tal forma que a união desses pontos forme a região segura de operação. Entretanto, quando se avalia a concepção original da metodologia do PSO, baseada nos fatores sociais e cognitivos, a tendência é que ao longo das iterações, a interação social entre as partículas (baseada na



parcela multiplicada pelo termo  $c_2$  na Equação (3.3)) faça com que todas se aproximem de um único ponto, que seria a maior distância global, ao invés de encontrar as margens de segurança em diferentes direções, conforme indicado na Figura 32a. Sendo assim, a estratégia utilizada no trabalho elimina a característica social do método, estratégia definida em [81] e empregada em [65] como modelo apenas cognitivo (do inglês, *cognition only*), de tal forma que o movimento da partícula se baseia apenas em sua posição e velocidade prévias, juntamente com sua característica cognitiva referente ao melhor ponto já percorrido. Com essa nova estratégia, espera-se que cada partícula busque um ponto ótimo único, conforme indicado na Figura 32b.

Vale destacar que a posição da partícula e sua velocidade são grandezas definidas em um espaço bidimensional, formado pelos grupos independentes que compõem o nomograma da região de segurança. Sendo o grupo de referência, a potência da subestação, as posições e velocidades das partículas são definidas em duas componentes, a potência gerada pelos REDs e a potência demandada pela carga. Outros parâmetros associados às partículas são, sua inércia e a aptidão da sua solução, também entendido como sua função objetivo (FOB), que mensura a qualidade da solução encontrada no problema de otimização. No problema em questão, a qualidade da solução está associada à distância em relação ao ponto inicial de operação, de modo que a FOB será maior quanto mais distante do ponto inicial de operação, preservando os limites monitorados.

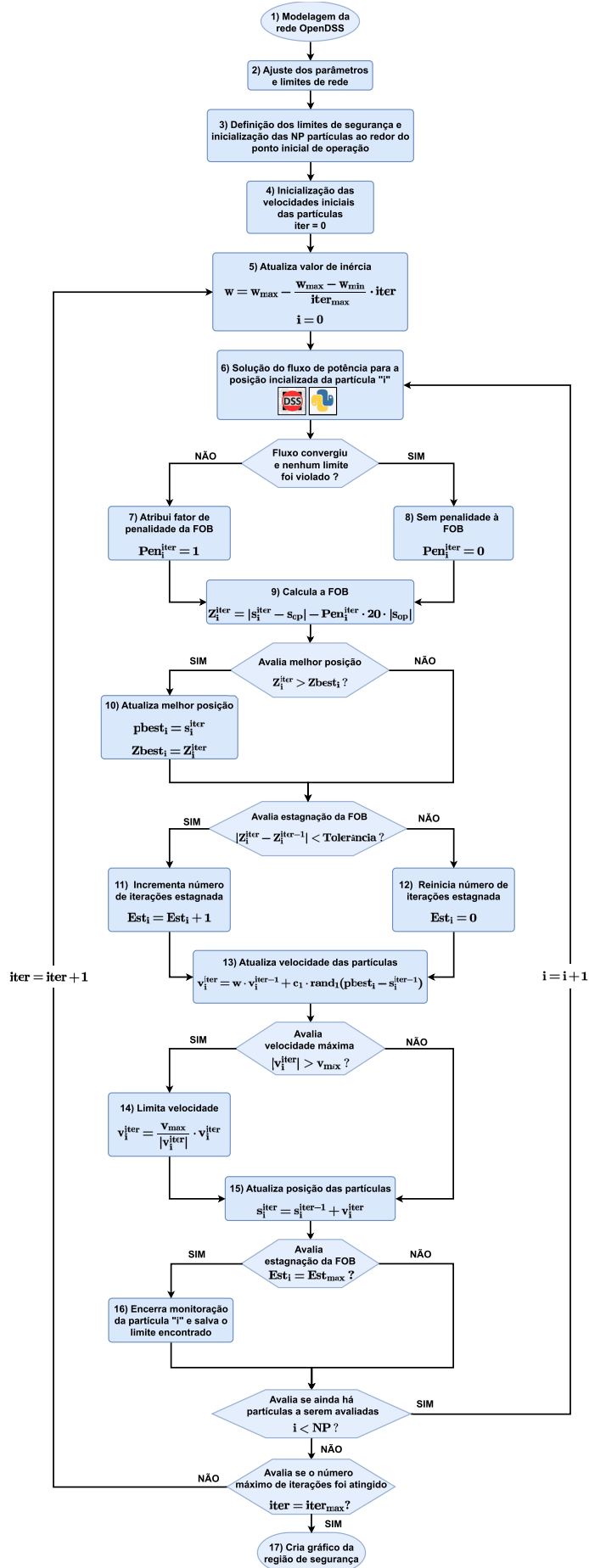
Figura 32 – Influência da característica social no PSO.



(a) Característica social existente ( $c_2 \neq 0$ )      (b) Característica social inexistente ( $c_2 = 0$ )

Fonte: Adaptado de [65].

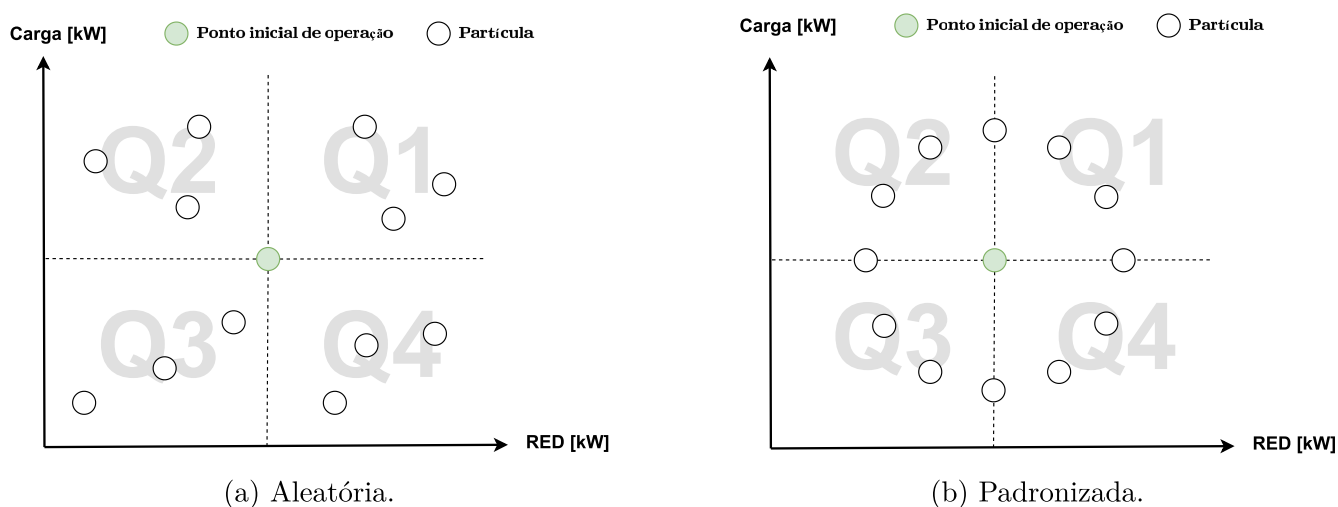
A partir da estratégia definida é possível descrever como a metodologia PSO pode ser aplicada ao problema de construção da região de segurança, cuja descrição encontra-se no fluxograma da Figura 33. As Etapas 1 e 2 são as mesmas da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

tradicional, nas quais são feitas a modelagem da rede e ajuste dos parâmetros e limites da simulação. Na Etapa 3, define-se quais as grandezas serão monitoradas, o número de partículas (NP) que será utilizado e a distribuição dessas partículas ao redor do ponto de operação. Essa inicialização pode ser feita de forma aleatória ou padronizada, conforme indicado na Figura 34. Na inicialização aleatória (Figura 34a), a posição de cada partícula é escolhida aleatoriamente, desde que o número de partículas em cada quadrante seja igual ou próximo. Já na inicialização padronizada (Figura 34b), as partículas são distribuídas em uma circunferência ao redor do ponto inicial de operação, garantindo uma separação equidistante entre as partículas adjacentes e em relação ao ponto inicial de operação. Empiricamente, observa-se que a distribuição padronizada das partículas apresenta uma maior área da região segura, sendo utilizada como forma de inicialização para as simulações deste trabalho. Vale destacar que todas as posições iniciais devem ser inicializadas suficientemente perto do ponto inicial de operação para garantir que sejam pontos de operação convergidos e seguros, e assim garantir o funcionamento adequado do método.

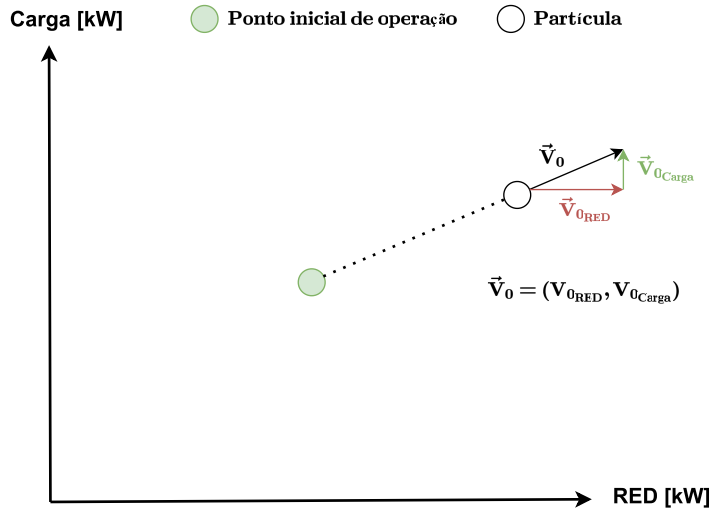
Figura 34 – Inicialização das partículas do PSO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Etapa 4 marca a iteração inicial ( $iter = 0$ ), onde se inicializa a velocidade das partículas. Essa etapa é importante, uma vez que se mantida uma velocidade inicial nula, pela Equação (3.3) a partícula se manteria parada, tendo em vista que a melhor posição da partícula e sua posição inicial são iguais nas primeiras iterações do método, fazendo com que a segunda parcela da equação seja nula, e considerando também que a terceira parcela é constantemente nula uma vez que o coeficiente  $c_2$  é zerado para eliminar a interação social entre as partículas. Isto posto, a velocidade inicial da partícula será dada por um vetor na mesma direção da reta que interliga o ponto inicial de operação e a posição da partícula definida na Etapa 3, no sentido de afastar a partícula de sua posição inicial, conforme indicado na Figura 35.

Figura 35 – Inicialização velocidade da partícula.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Etapa 5 inicia o processo iterativo, onde se inicia a investigação da partícula definida pelo índice  $i$ , sendo que este índice varia até o número  $NP$  de partículas. Nessa etapa é feito o cálculo do valor de inércia, que se baseia nos limites de inércia máximo e mínimo ( $w_{max}$  e  $w_{min}$ , respectivamente), bem como o número de iteração atual ( $iter$ ) e o número máximo de iterações do método ( $iter_{max}$ ), que nada mais é que um número pré definido de iterações que ao ser atingido determina o fim do processo iterativo. Para o trabalho atual, utilizou-se o valor de  $iter_{max}$  igual a 30 iterações, sendo tal valor escolhido empiricamente. Na Etapa 6, é feita a solução do fluxo de potência para a partícula  $i$ , baseado em sua posição inicial definida. Em seguida, avalia-se se o fluxo de potência convergiu sem que nenhum limite monitorado fosse violado. Em caso negativo, atribui-se ao fator de penalidade da FOB da partícula em questão, o valor 1 (Etapa 7), sendo esta uma variável binária, que indica se a FOB deve ou não ser penalizada. Naturalmente, se o fluxo convergiu sem nenhum limite violado, esta variável será nula (Etapa 8). Em seguida, na Etapa 9, avalia-se a FOB para a posição atual da partícula, cuja valor é calculado pela Equação (4.1), onde  $s_i^{iter}$  é a posição da partícula  $i$  na iteração atual,  $s_{op}$  é a posição do ponto de operação inicial e  $Pen_i^{iter}$  é o fator de penalidade, que irá penalizar a FOB em um valor empiricamente escolhido de vinte vezes o módulo da posição do ponto de operação inicial.

$$Z_i^{iter} = |s_i^{iter} - s_{op}| - Pen_i^{iter} \cdot 20 \cdot |s_{op}| \quad (4.1)$$

$$Z_i^{iter} = \sqrt{(s_{iRED}^{iter} - s_{opRED})^2 + (s_{iCarga}^{iter} - s_{opCarga})^2} - Pen_i^{iter} \cdot 20 \cdot \sqrt{(s_{opRED})^2 + (s_{opCarga})^2} \quad (4.2)$$

Na sequência, avalia-se se a FOB da iteração atual,  $Z_i^{iter}$  é superior à melhor FOB

registrada por aquela partícula desde o início do processo  $Zbest_i$ . Em caso afirmativo, é necessário atualizar os valores da melhor FOB e da melhor posição da partícula, conforme indicado na Etapa 10. Em caso negativo, avança-se para a condicional em que se investiga se a variação da FOB é inferior a uma determinada tolerância, de modo a contar o número de iterações em que a variação da FOB é desprezível, e que será utilizado como indicativo de que a FOB tenha estagnado, ou seja, caso a FOB não apresente maiores valores ao longo das iterações, ou ainda, caso tais variações sejam desprezíveis de modo que não justifique a continuidade da busca por uma melhor solução, a FOB será considerada estagnada e encerra-se o processo iterativo para aquela partícula. Neste trabalho, adota-se como variação desprezível de FOB, aquela na qual a variação da FOB entre duas iterações consecutivas seja inferior a 0,005%. Dessa forma, caso a condicional seja verdadeira, incrementa-se um contador ( $Est_i$ ) que indica o número de iterações em que a FOB está estagnada (Etapa 11). Caso contrário, reinicia-se o contador em questão (Etapa 12).

Em sequência, atualiza-se a velocidade da partícula na Etapa 13, conforme definido pela Equação (3.3). Na condicional seguinte, é avaliado se a velocidade é superior um valor máximo pré definido, de forma que em caso positivo, limita-se o módulo da velocidade em seu valor máximo, porém mantendo a direção do vetor (Etapa 14). O valor máximo de velocidade utilizado para este trabalho foi escolhido de modo análogo ao passo de potência, como sendo 20% da carga do sistema, obtido empiricamente. Em caso negativo, avança-se diretamente para a Etapa 15, onde é feita a atualização da posição da partícula, conforme Equação (3.5), com a ressalva de que as coordenadas que definem a posição da partícula devem sempre ser valores maiores ou iguais a zero. Na sequência, é avaliado se o contador  $Est_i$  atingiu o número máximo de iterações para considerar a partícula estagnada ( $Est_{max}$ ). Em caso afirmativo, que corresponde à Etapa 16, a partícula  $i$  já tem o seu limite de segurança definido, e deixa de ser monitorada nas próximas iterações. Em caso negativo, a partícula continua sendo monitorada e segue-se para a etapa seguinte.

Na etapa seguinte, avalia-se se o índice  $i$  referente ao número da partícula é menor que o número total de partículas, indicando que ainda há partículas a serem atualizadas naquela iteração. Em caso positivo, reinicia-se o *loop* para a partícula seguinte, o que é feito ao atualizar o índice  $i$  e retornar à Etapa 6. Em caso negativo, ou seja, caso todas as partículas já tenham sido avaliadas nessa iteração, segue-se para a condicional seguinte, onde investiga-se se o número máximo de iterações do método  $iter_{max}$  foi atingido. Em caso negativo, reinicia-se todo o processo para a iteração seguinte, retornando à Etapa 5, com a consideração de que nessa iteração, não necessariamente todas as partículas precisam ser avaliadas, apenas as partículas que não tenham a FOB estagnada identificadas na Etapa 16. Entretanto, se o número máximo de iterações tiver sido atingido, o processo iterativo é encerrado, e avança-se para Etapa 17, onde, a partir das melhores posições de cada partícula, interliga-se os pontos criando a região de segurança do sistema.

#### 4.4 Processamento paralelo

O processo de construção da região de segurança apresentado até o momento é formado por diversas etapas, que sob o ponto de vista computacional, são interpretadas como um conjunto de instruções executadas de forma serial, tal como foram apresentadas no fluxogramas anteriores. Ou seja, para que uma instrução ou uma etapa do processo seja executada é necessário que a etapa imediatamente anterior tenha sido concluída, gerando uma relação de dependência entre as etapas e uma estrutura serial no fluxo de atividades.

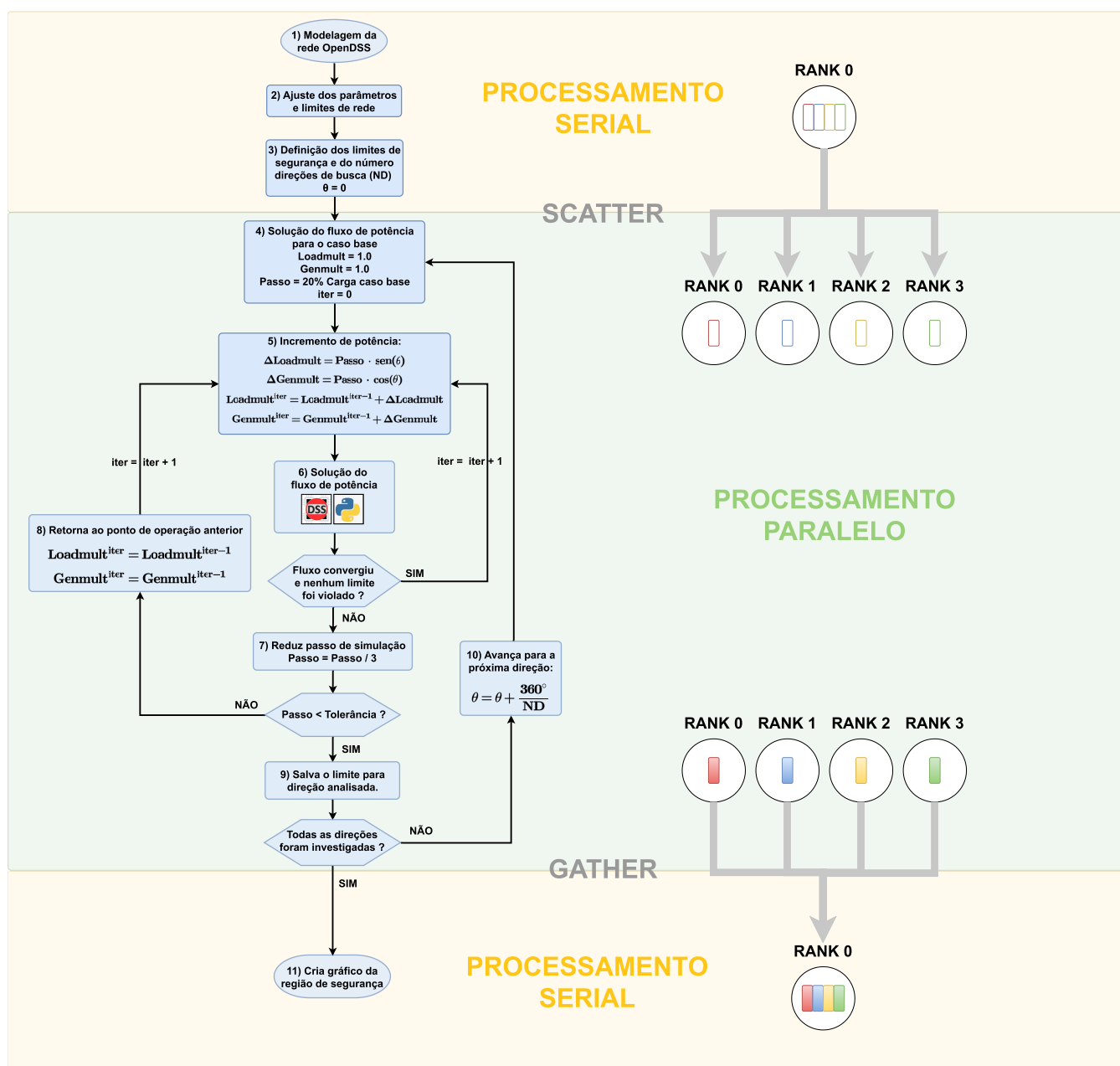
Considerando que, a depender do tamanho da região a ser analisada, o tempo de processamento para construção da SSR pode ser elevado, faz-se necessária uma estratégia para agilizar esse processo. Neste contexto, a utilização do processamento paralelo é tida como uma excelente forma de redução do tempo computacional, uma vez que ao identificar etapas de um determinado processo que não sejam dependentes entre si, podem ser executadas de forma simultânea, reduzindo expressivamente o tempo de execução. Para o processo de construção da SSR, descrito neste trabalho, o padrão de comunicação de dados em computação paralela (do inglês, *Message Passing Interface (MPI)*) pode facilmente ser aplicado nas duas metodologias propostas, de modo a paralelizar o processo iterativo entre as direções de busca ou entre as partículas avaliadas, uma vez que uma direção analisada na metodologia tradicional não possui nenhuma dependência das demais direções para o processo análise do limite de segurança, bem como uma partícula, no método PSO, devido à extinção da interação social, não tem qualquer dependência com as demais partículas existentes, permitindo que tais atividades sejam realizadas simultaneamente dentro de seus respectivos processos.

A quantidade de processos que podem ser executados simultaneamente irá depender do número de linhas de execução (do inglês, *threads*) disponíveis em um processador, sendo portanto associado à característica construtiva do *hardware* utilizado [85]. De maneira simplificada, um *hardware* que possua disponíveis um número  $n$  de *threads* será capaz de realizar  $n$  processos simultaneamente. Assim, é possível se utilizar do MPI a fim de que cada  $n$  direções de busca, ou  $n$  partículas tenham seu processo iterativo executado em paralelo, cada uma sendo processada em uma *thread*. E ao final do processo, quando todas as *threads* tiverem seus processos concluídos, as informações são reunidas em uma única linha de execução, que será responsável por armazenar os dados obtidos e gerar a região de segurança com tais informações.

Na Figura 36 é possível observar como o MPI pode ser aplicado sobre a metodologia definida na seção 4.2, adaptando o fluxograma da Figura 30, sendo utilizado para a biblioteca MPI4PY [86] para realizar o processamento paralelo. As Etapas de 1 a 3 são executadas de forma sequencial, através do linha de execução denominada rank 0. Para executar a Etapa 4, utiliza-se a função *scatter* para distribuir as informações disponíveis no rank 0 para outras três linhas de execução. E o processo iterativo correspondente às

Etapas de 4 a 10 é dividido entre as quatro linhas de execução. Supondo um cenário em que houvessem 12 direções de busca, é possível que essas direções sejam divididas de forma que o rank 0 seja responsável pelas direções 0, 30° e 60°. O rank 1, pelas direções 90°, 120° e 150°. O rank 2, por 180°, 210° e 240° e o rank 3, por 270°, 300° e 330°. Ao final da execução de todos os ranks, as informações são reunidas para o rank 0 através da função *gather*. Permitindo que o processamento e construção final da SSR, correspondente à Etapa 11, seja feito de forma serial.

Figura 36 – Fluxograma da metodologia tradicional aplicando MPI



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Considerações parciais

Neste capítulo evidenciam-se as diferenças entre a SSR para sistemas de transmissão e para sistemas de distribuição, destacando a necessidade de adaptação do método utilizado tradicionalmente em sistemas de potência para construção da região de segurança em regime permanente. Duas metodologias são propostas, a primeira mantém um passo de potência fixo entre as iterações, que só é reduzido quando algum dos limites monitorado é violado. Também neste método, a proporção entre o incremento de potência nos eixos das abscissas e ordenadas é mantida fixa e de acordo com o ângulo de busca, ou seja, o processo de busca fica restrito a pontos de operação que estejam em uma mesma direção. Já na segunda metodologia, baseada no método PSO, otimiza-se o passo de potência ao longo das iterações, e permite-se que uma mesma partícula tenha liberdade para variar as potências nos eixos ordenados da forma que for conveniente durante seu processo de busca, possibilitando, portanto, variar a taxa de incremento de potência nos eixos ordenados entre as iterações do método, e assim, localizar pontos de operação que estejam o mais afastados possíveis em relação ao ponto inicial de operação, independente de sua trajetória. Por tais razões, espera-se que a metodologia PSO apresente um melhor desempenho na construção da região de segurança quando comparado à metodologia tradicional.

Destaca-se também que ambas metodologias possuem processos que são independentes entre si e podem ser realizados de forma paralela. No caso da metodologia tradicional, essa paralelização ocorre entre a análise de diferentes direções de busca, e na metodologia PSO, ocorre entre a análise de diferentes partículas. Espera-se que ao utilizar o processamento paralelo em ambas metodologias, o tempo de processamento para a construção da SSR se reduza significativamente.



## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a construção da SSR utilizando a metodologia tradicional e a metodologia PSO. Para cada uma das metodologias apresentadas, serão testados dois sistemas de distribuição (IEEE 13 barras e CKT5), e alterado o número de indivíduos disponíveis em um cada um deles. Finalmente, será feita uma análise de como o processamento paralelo pode aumentar a eficiência da construção da regiões de segurança, reduzindo o tempo computacional demandado.

Vale destacar que, apesar de ambos os sistemas aqui apresentados terem capacidades instaladas específicas de carga e de geração dos REDs, o objetivo do estudo é de estressar o sistema a fim de encontrar os limites da operação segura, de tal forma que pontos operativos com valores superiores à característica nominal do sistema podem ser observados. Tais cenários podem representar, por exemplo, um aumento da demanda do sistema, ou ainda a ampliação da participação dos REDs na rede de distribuição. Portanto, os valores de carga e geração passam a ser limitados apenas pela condição de convergência do fluxo de potência, podendo apresentar quaisquer valores positivos ou nulo.

### 5.1 Sistema de distribuição IEEE 13 Barras

#### 5.1.1 Descrição sistema

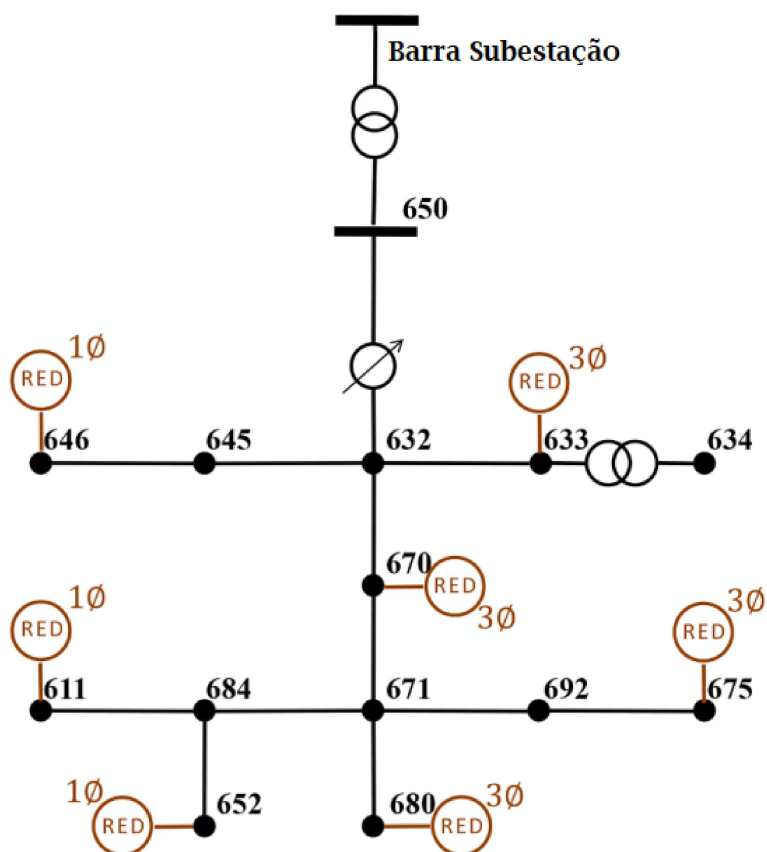
O sistema IEEE 13 barras representa uma rede de distribuição trifásica desequilibrada, ao qual foram adicionados REDs, que, nesse trabalho, representam pontos de GDs, a fim de verificar a região de segurança em sua operação. Na Figura 37 é possível ver o unifilar do sistema, e os pontos de conexão dos REDs. O sistema possui uma demanda de 3466 kW, contendo cargas monofásicas e trifásicas nos níveis de tensão de 4,16 e 0,48 kV, modeladas como potência constante, ou seja, as potências ativa e reativa se mantêm constantes independente do valor da tensão. A conexão com a subestação em 115 kV é feita por um transformador OLTC trifásico de 5000 kVA, enquanto que a rede de baixa é conectada por um transformador trifásico de 1000 kVA entre as barras 633 e 634. A distribuição dos REDs no sistema é feita de forma também desequilibrada, baseada em [63], e detalhada na Tabela 4, possuindo uma capacidade instalada total de 1520 kW.

As grandezas monitoradas para construção da SSR serão a corrente nas linhas, sob condição normal e emergencial, a potência aparente dos transformadores, o nível de tensão das barras e a convergência do fluxo de potência. Os valores de referência para tais grandezas são listados abaixo, sendo a faixa de tensão adequada baseada no módulo 8 do PRODIST [87] e os demais parâmetros inerentes à rede em questão.

- Faixa de tensão adequada: 0,95 a 1,05 por unidade (p.u.);

- Potência aparente do transformador entre as barras 650 e Subestação: 5000 kVA;
- Potência aparente do transformador entre as barras 633 e 634: 1000 kVA;
- Limite de corrente nas linhas sob condição normal: 700 A;
- Limite de corrente nas linhas sob condição emergencial: 770 A.

Figura 37 – Sistema IEEE 13 Barras modificado.



Fonte: Adaptado de [63].

Tabela 4 – Distribuição REDs no sistema IEEE 13 barras.

Barra	$PG_{RED}$ [kW]	Fases	Barra	$PG_{RED}$ [kW]	Fases
675	500	abc	646	50	c
633	400	abc	611	40	c
670	300	abc	652	30	a
680	200	abc	-	-	-

Fonte: Extraído de [63].

### 5.1.2 Metodologia Tradicional

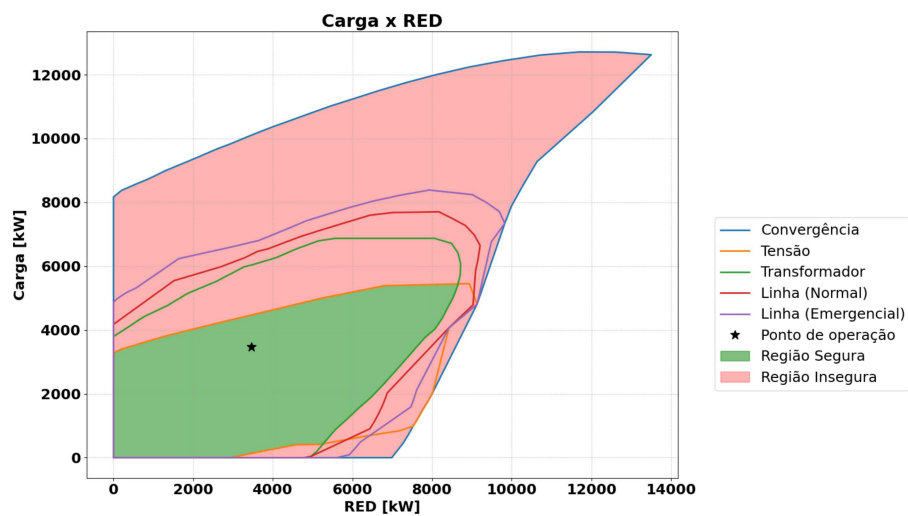
A construção da SSR para o sistema IEEE 13 foi feita utilizando um número total de 144 direções de busca, o que equivale a buscas a cada intervalo de  $2,5^\circ$ . A partir disso, chegou-se na SSR apresentada na Figura 38 na qual são apresentados os nomogramas que indicam os pares de eixos que compõem a região, sendo o eixo de referência, a potência da subestação, juntamente com os eixos de Carga e REDs. Para construção da SSR e representação de cada um dos limites monitorados individualmente, foi executado um total de 7077 fluxos de potência em um tempo de 171,47 segundos, utilizando processamento serial.

É possível observar pelos nomogramas que a região de segurança é limitada pela tensão da rede (curva em laranja) e pela potência aparente dos transformadores (curva em verde). Analisando o nomograma 38a que avalia os grupos de variação de potência, Carga e RED, é possível observar que para valores de carga e RED inferiores ao ponto inicial de operação, a limitação é a tensão do sistema, enquanto que apenas em condições de elevada geração pelos REDs que a limitação passa a ser o fator limitante na segurança, o que é representativo de uma inversão no fluxo da rede, conforme visto no nomograma 38b, onde a potência na subestação é negativo, representando o fluxo no sentido do RED para a subestação. Quando se avalia o nomograma 38c observa-se que a limitação pelo transformador ocorre para uma faixa de potência específica onde há o fluxo reverso, sendo uma faixa em torno de 4000 kW, ainda que a carga tenha uma variação significativa acima ou abaixo do ponto de operação inicial, indicando portanto a relação desse limite com o excedente de geração pelos REDs.

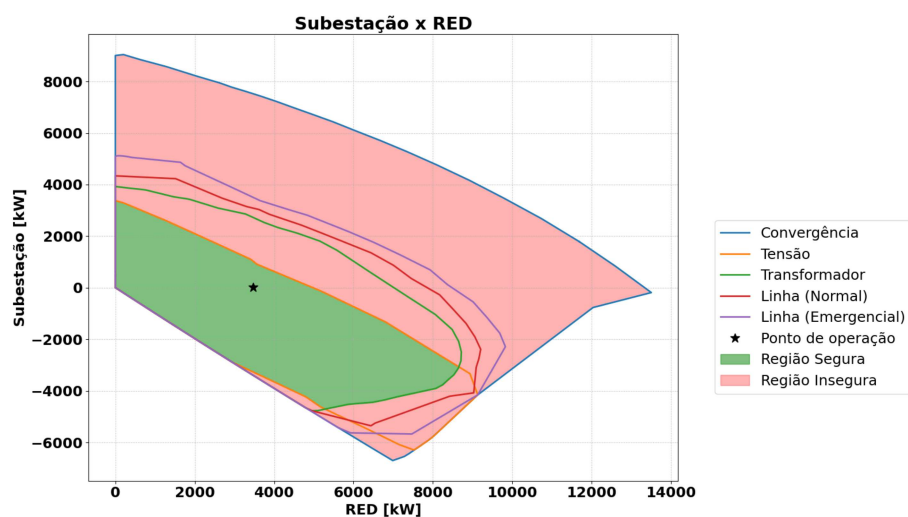
Quando se analisa os limites de corrente nas linhas, é possível observar que mesmo em condição normal (curva em vermelho), nenhuma das linhas da rede tem seu limite violado, uma vez que não há interseção entre o limite da região segura com a curva que representa a limitação de corrente, exceto nos casos em que o sistema não converge, onde todos os limites são coincidentes. Como esperado, é o limite de corrente de corrente emergencial (curva em roxo) é menos restritivo que o limite de condição normal, sendo atingindo apenas para superiores de carga e RED conforme visto no nomograma 38a. Nesse contexto, é possível constatar que ações para ampliação da margem de segurança do sistema devem focar principalmente, em suporte de tensão, seguido de reforços na capacidade de transformação deste sistema, ao passo que reforços nas linhas poderiam ser postergados nesse primeiro momento, com a ressalva de que com as demais intervenções citadas, o fluxo nas linhas não apresente aumentos significativos que levem à violação da capacidade térmica dos condutores.

Na Figura 39 mostra-se a alteração da região de segurança de acordo com o número de direções investigadas, variando de 24 a 144 direções. Para essa análise, foi utilizado o nomograma que retrata as duas grandezas de controle, que são a Carga e a geração

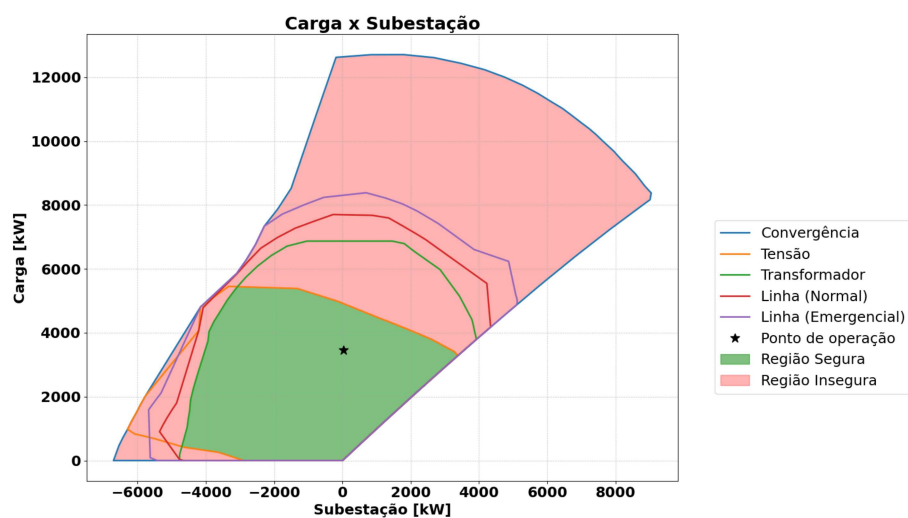
Figura 38 – Região de segurança completa para o sistema IEEE 13 Barras utilizando método tradicional.



(a) Carga x RED.



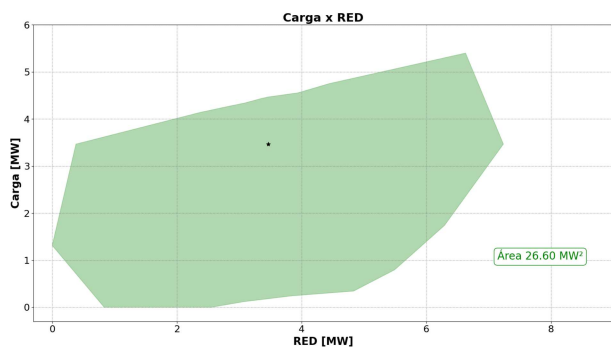
(b) Subestação x RED.



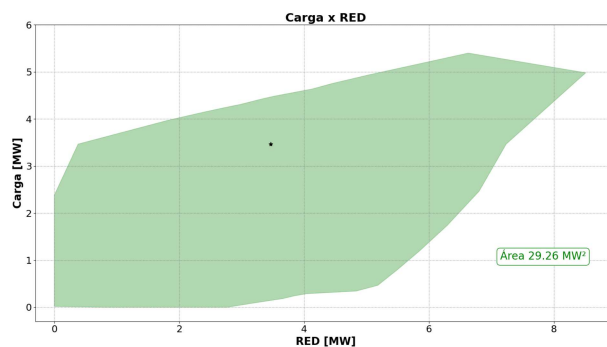
(c) Carga x Subestação

Fonte: Elaborado pelo autor.

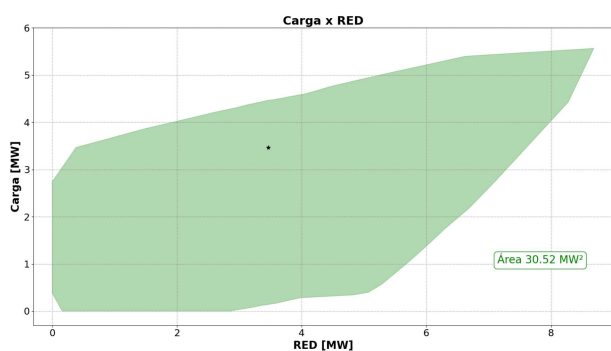
Figura 39 – Variação da região de segurança com o número de direções na metodologia tradicional para o sistema IEEE13.



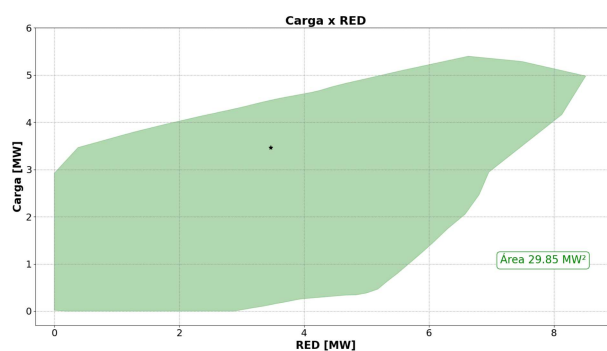
(a) 24 direções.



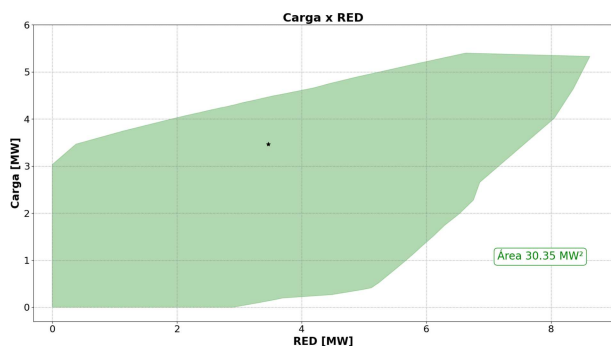
(b) 48 direções.



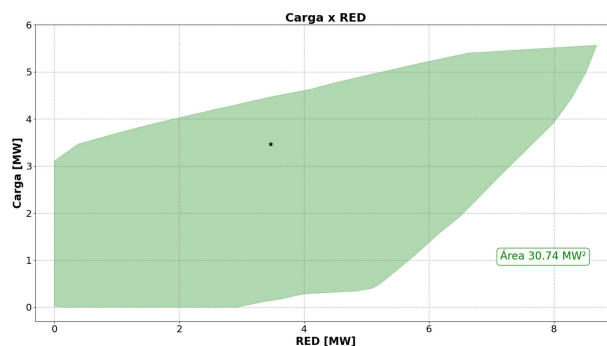
(c) 72 direções.



(d) 96 direções.



(e) 120 direções.



(f) 144 direções.

Fonte: Elaborado pelo autor.

dos REDs, sendo exibido somente o contorno da região segura. Ao lado de cada região é informada a área daquela respectiva região, de modo que quando maior a área, maior o número de configurações operativas em que a carga e os REDs podem variar, respeitando os limites monitorados.

Os nomogramas de 39a a 39f indicam uma tendência natural de crescimento da área segura com o aumento do número de direções, uma vez que, ao investigar um número maior de direções, é possível maximizar, para cada direção, a distância do ponto de operação em relação ao ponto inicial, de modo que a região formada pela interligação desses pontos seja a maior possível. Entretanto, tal crescimento não é linear, uma vez que certos casos,

apesar de terem um número de direções inferiores, podem percorrer direções específicas em que a margem de segurança seja suficientemente elevada, de forma a elevar a área da região formada, é o que ocorre por exemplo quando se compara o nomograma 39c com 39d. Apesar de 39c apresentar 72 direções, o intervalo de busca, faz com que seja localizado um ponto de operação seguro em uma condição de carga superior a 5 MW, e RED superior a 8 MW, responsável por aumentar a área da região segura quando comparado ao nomograma 39d, em que tal ponto não é localizado, apesar de possuir 96 direções. Já quando se avalia a área do nomograma 39f, ela é maior que a área formada 39c, uma vez que o intervalo de busca entre uma direção e outra no caso de 144 direções é exatamente a metade do intervalo do caso de 72 direções, de forma tal que todas as direções investigadas neste caso também o serão no caso de 144 direções. Mas, de modo geral, pode-se dizer que o aumento do número de direções de busca implica no aumento da área da região segura.

#### 5.1.2.1 Processamento Paralelo

A Tabela 5 descreve o número de fluxos de potências resolvidos e o tempo gasto para a construção das regiões seguras exibidas na Figura 39 de acordo com o número de direções de busca e utilizando processamento serial (neste caso, o tempo exibido é referente apenas à construção da região segura, não sendo traçados os limites individualmente tal como na Figura 38). É possível observar que o número de fluxos de potência resolvidos o tempo de processamento seguem uma relação aproximadamente linear com o crescimento do número de direções de busca. O *hardware* utilizado para as simulações possui um processador Ryzen 5 2400G de 4 núcleos / 8 threads e clock básico de 3.6 GHz, e 16 Gb de memória RAM.

Tabela 5 – Fluxos resolvidos para sistema IEEE 13 Barras com metodologia tradicional.

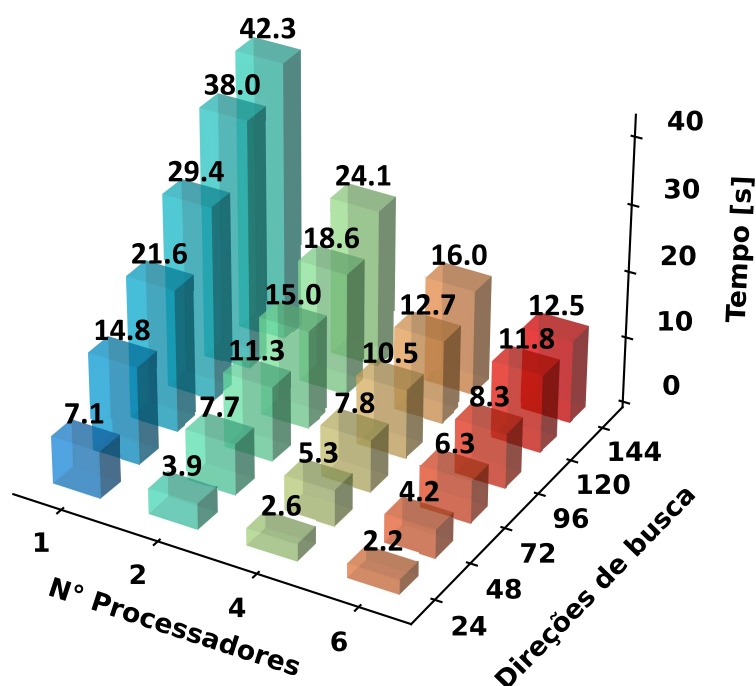
Direções de busca	Fluxos resolvidos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [s]
24	291	26,60	7,12
48	609	29,26	14,79
72	904	30,52	21,58
96	1198	29,85	29,38
120	1491	30,35	38,00
144	1815	30,74	42,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência, a Figura 40 destaca o tempo de processamento para a construção da mesma região de segurança, porém utilizando o processamento paralelo. Alternando o número de processadores entre 1 (serial), 2, 4 e 6. É notório que o processamento paralelo reduz significativamente o tempo de construção da região de segurança. Em média, o uso de 2 processadores, reduz o tempo em cerca de 47%. Já para o uso de 4 processadores, essa redução chega a ser de 64%, e por fim, para o uso de 6 processadores, 70% de redução.

Desta forma, deve-se conciliar a qualidade da região formada, determinada pelo número de direções de busca, com o número ideal de processadores, estando associado à limitação do *hardware* utilizado. Dessa forma, é possível construir a SSR com 144 direções (Figura 39f) utilizando 6 processadores, em um tempo inferior ao gasto para construção da SSR com 48 direções (Figura 39b) com processamento serial, garantindo uma melhor qualidade da região construída em um tempo reduzido, o que evidencia a importância desse tipo de processamento para o processo em questão.

Figura 40 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema IEEE 13 barras utilizando processamento paralelo e metodologia tradicional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3 Metodologia PSO

A construção da SSR para o sistema IEEE 13 foi feita utilizando um número total de 144 partículas. A partir disso, chegou-se na SSR apresentada na Figura 41. Ao todo foram executados um total de 13774 fluxos de potência em um tempo de execução de 621,44 segundos, utilizando processamento serial. Vale destacar que, apesar de apresentada a região de segurança com o limite de cada grandeza monitorada, a metodologia PSO proposta é focada na construção do limite apenas da região segura, não sendo uma metodologia eficiente para a construção de cada limite individualmente, uma vez que, diferentemente da metodologia tradicional, pela natureza do processo de busca, não é

possível definir um passo e *loop* secundários como proposto no fluxograma da Figura 31. Dessa forma, para que cada limite tenha seu contorno definido de forma precisa, é necessário executar um *loop* para cada limite, o que torna o processo altamente custoso sob o ponto de vista computacional, justificando o tempo de processamento significativamente superior àquele apresentado para construção da Figura 38 na seção 5.1.2.

No que se refere à análise da região de segurança, as mesmas colocações feitas na seção 5.1.2 são válidas, tendo em vista que os contornos apresentados nas Figuras 41 e 38 são semelhantes. A diferença mais significativa entre os gráficos está no contorno referente à convergência (curva em azul) para configurações de carga e geração dos REDs superiores a 10 GW, o que se deve, simplesmente, à limitação do número máximo de iterações do método PSO, que fazem com que o método atinja o número máximo de iterações. Sendo tal número ajustado, empiricamente, para a obtenção do limite da região segura.

Foram utilizados como configurações do PSO uma inércia máxima de 1,3 e mínima de 0,1. Os coeficientes  $c_1$  e  $c_2$  iguais a 2 e 0, respectivamente. Número máximo de 30 iterações, sendo definido um critério de estagnação de 10 iterações, ou seja caso a FOB da partícula não apresenta melhora em 10 iterações, tal partícula deixa de ser atualizada. A velocidade máxima de cada partícula é definida em uma potência correspondente a 20% da carga inicial.

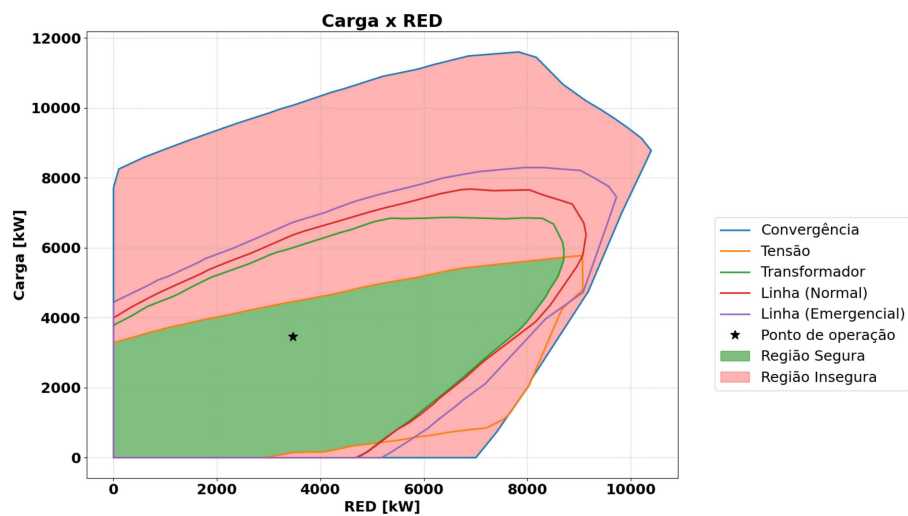
Na sequência, apresenta-se na Figura 42, a variação dos limites da região de segurança de acordo com o número de partículas, a fim de trazer uma visão qualitativa da região gerada. Tendo em vista que o processo possui uma estocasticidade associada ao movimento das partículas, a comparação entre os valores das áreas formadas nos nomogramas de Carga x RED é feita através de gráficos *boxplot*, onde são executados 10 simulações para cada arranjo de partículas selecionado (24, 48, 72, 96, 120 e 144 partículas). A partir do *boxplot*, extrai-se os valores da média, mediana e os quartis dentro dos quais a área da região simulada foi compreendida. O resultado é exibido na Figura 43.

Quando comparado aos nomogramas obtidos na Figura 39, observa-se que a região segura tende a convergir para o mesmo contorno, a medida que o número de direções e partículas aumentam nos respectivos métodos. Quando comparados os nomogramas 39a e 42a, onde se utilizam 24 direções de busca e 24 partículas, respectivamente, observa-se que o método PSO consegue reproduzir melhor os limites da região segura, especialmente na região próxima a origem dos eixos, onde a carga e a geração dos REDs são mínimas. Já para os demais nomogramas, observam-se resultados semelhantes.

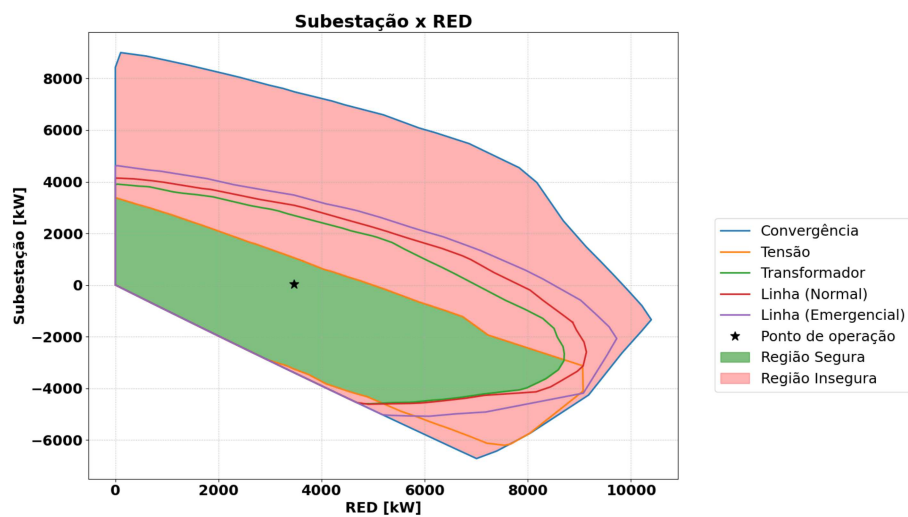
Sob o ponto de vista da Figura 43, observa-se um aumento na média entre as áreas a medida que o número de partículas cresce, bem como os valores do primeiro e terceiro quartis, que delimitam a faixa na qual 50% dos resultados mais próximos à mediana estão compreendidos.



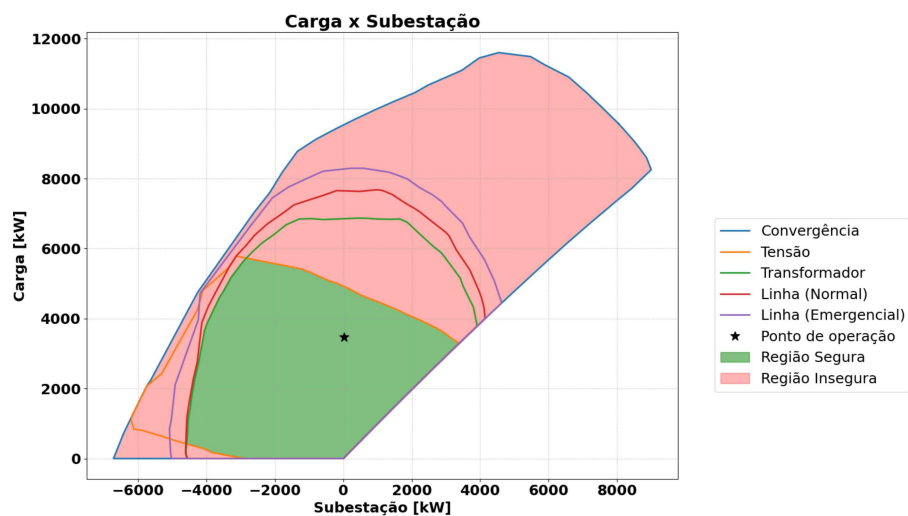
Figura 41 – Região de segurança completa para o sistema IEEE 13 Barras utilizando método PSO.



(a) Carga x RED.



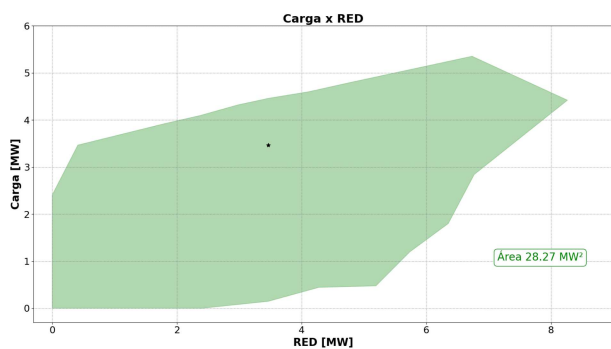
(b) Subestação x RED.



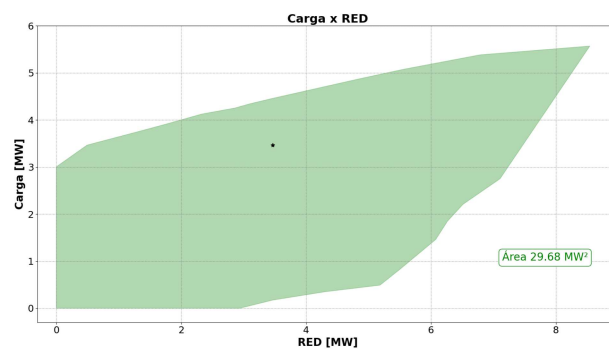
(c) Carga x Subestação

Fonte: Elaborado pelo autor.

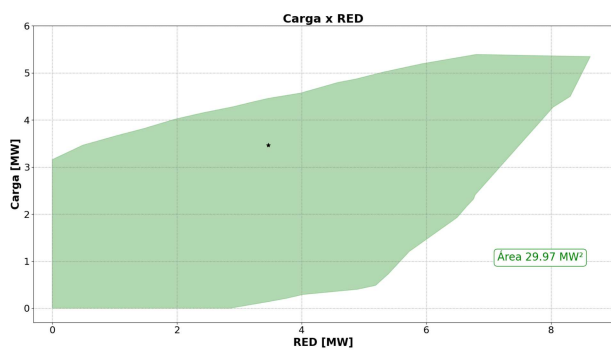
Figura 42 – Variação qualitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema IEEE 13 Barras.



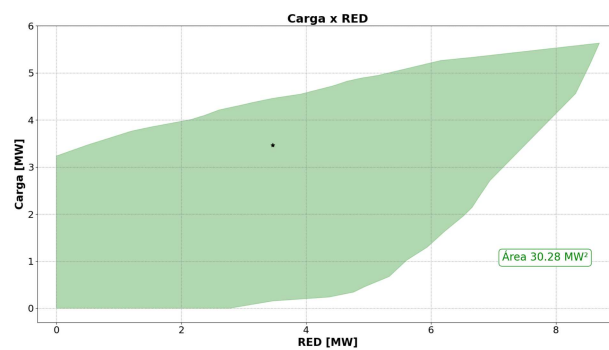
(a) 24 partículas.



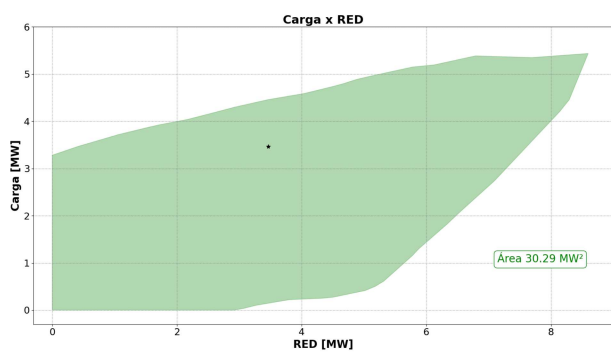
(b) 48 partículas.



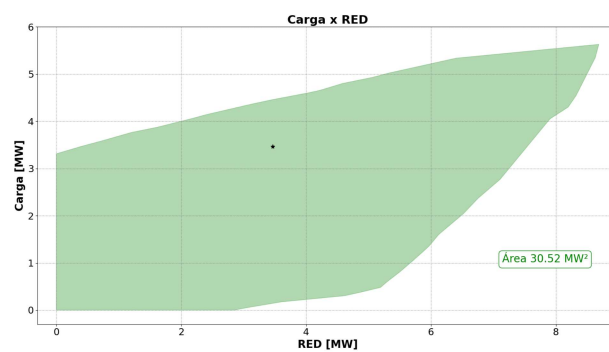
(c) 72 partículas.



(d) 96 partículas.



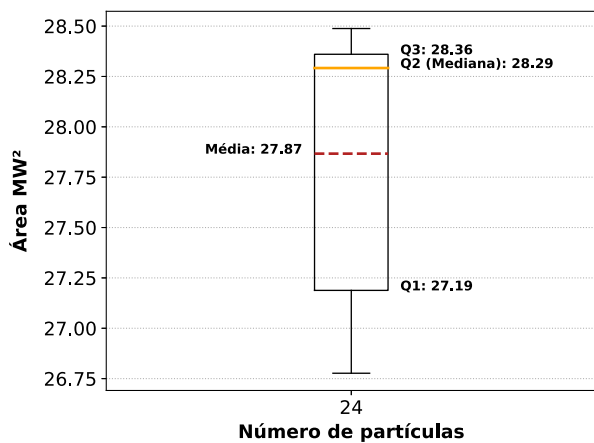
(e) 120 partículas.



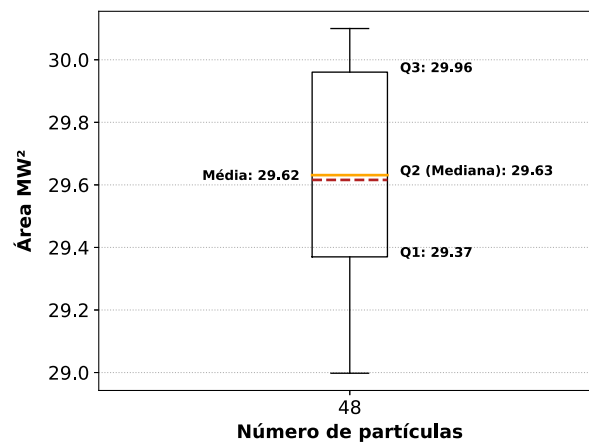
(f) 144 partículas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

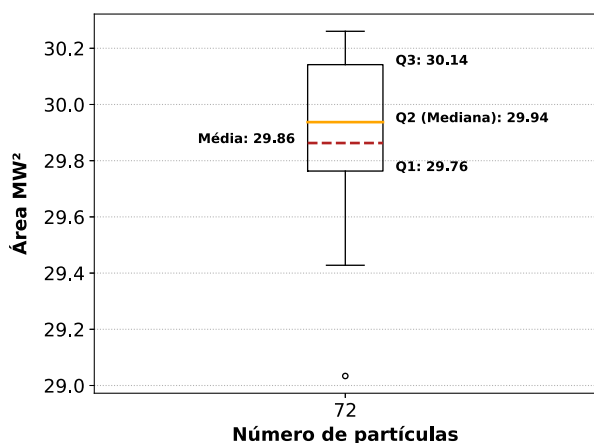
Figura 43 – Variação quantitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema IEEE 13 Barras.



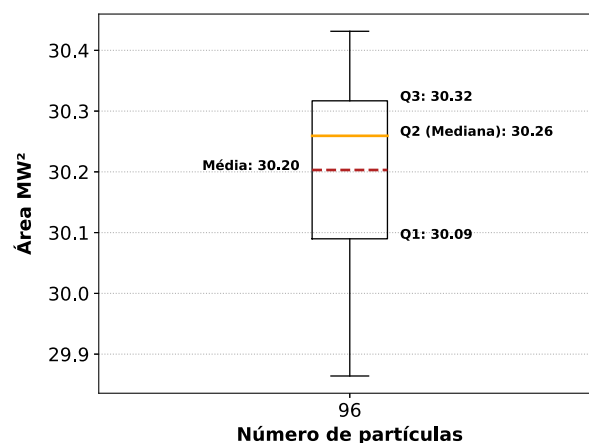
(a) 24 partículas.



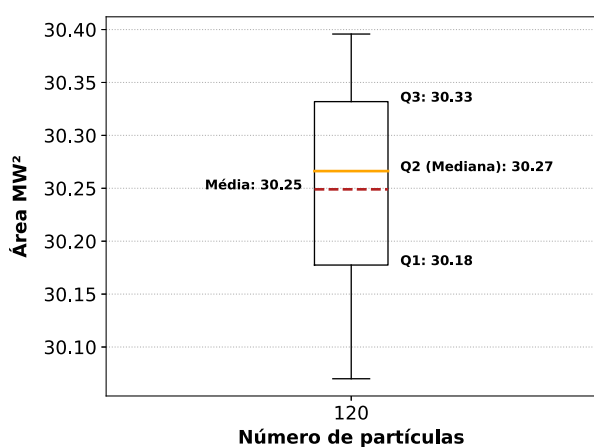
(b) 48 partículas.



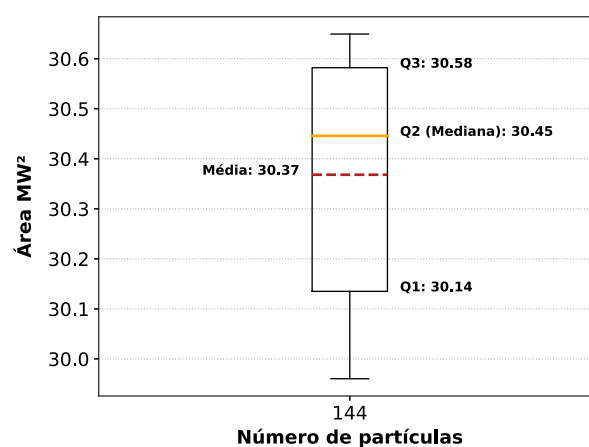
(c) 72 partículas.



(d) 96 partículas.



(e) 120 partículas.



(f) 144 partículas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da média das 10 soluções obtidas para cada configuração de partículas, chega-se na Tabela 6 onde são apresentados o número de fluxos de potência resolvidos, a área da região segura do nomograma Carga x RED, e também o tempo total gasto para a construção da região segura (não contabilizando o tempo para traçar cada limite de segurança individualmente). Observa-se, tal como na metodologia tradicional, uma relação aproximadamente linear entre o número de fluxos resolvidos com o número de partículas. E também do tempo gasto com o número de partículas. Ou seja, o número de fluxos resolvidos e, conseqüentemente, o tempo gasto para simulação, apresentam uma tendência de crescimento linear com o aumento do número de partículas do método. Quando comparada à Tabela 5 observa-se um esforço computacional significativamente maior para o PSO quando o número de partículas é equivalente ao número de direções de busca no método tradicional, sem necessariamente resultar em uma melhor qualidade da região construída, com exceção da configuração inicial mencionada de 24 direções de busca e 24 partículas.

Tabela 6 – Fluxos resolvidos para sistema IEEE 13 Barras com metodologia PSO.

Número de partículas	Fluxos resolvidos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [s]
24	374	27,87	20,28
48	734	29,62	37,76
72	1062	29,86	58,49
96	1444	30,20	71,72
120	1820	30,25	91,73
144	2151	30,37	108,09

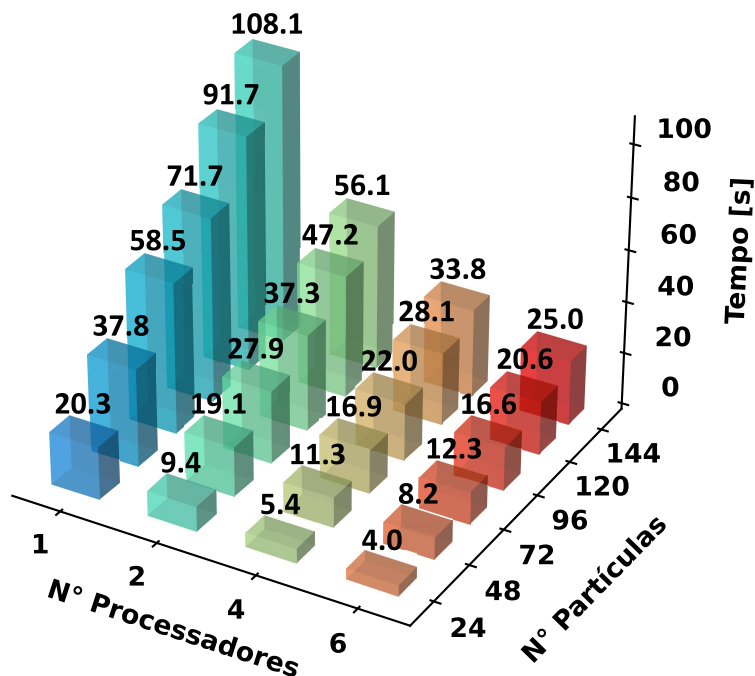
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3.1 Processamento Paralelo

Da mesma forma que foi feito na seção 5.1.2.1, nesta seção serão exibidos os ganhos obtidos ao se utilizar o processamento paralelo na construção da região de segurança para a metodologia PSO. Neste caso, é feita a divisão do grupo total de partículas presentes no sistema pelo número de processadores, e ao final, os dados serão reunidos no processador principal. As configurações do *hardware* utilizado para esta simulação são as mesmas descritas na seção 5.1.2.1.

A Figura 44 evidencia a redução do tempo de processamento de acordo com o aumento do número de processadores. Vale destacar que neste caso, os tempos exibidos em cada uma das barras correspondem à media de 10 simulações estocásticas utilizando a mesma configuração do PSO. Quando se avalia o tempo médio para todos os grupos de partículas destaca-se uma redução de 51% utilizando 2 processadores, 71% utilizando 4 processadores e 78% com 6 processadores, destacando, novamente, a efetividade dessa solução.

Figura 44 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema IEEE 13 barras utilizando processamento paralelo e metodologia PSO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

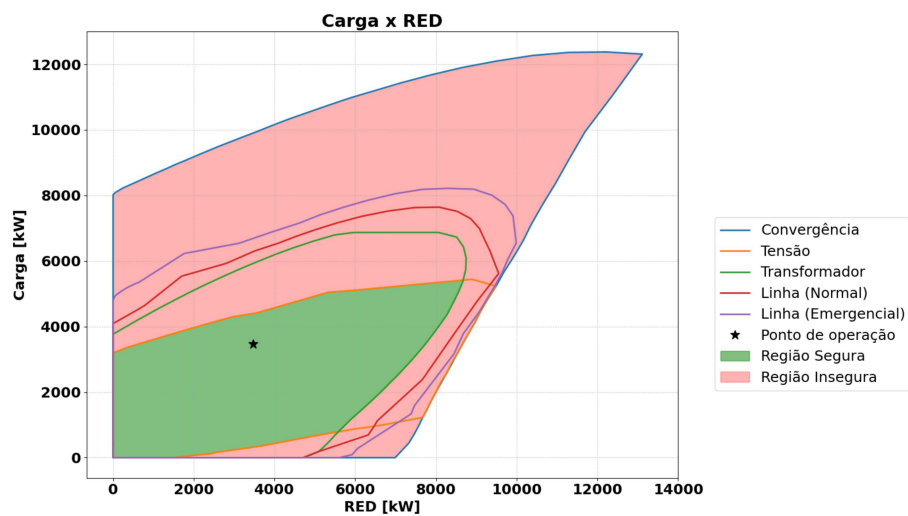
#### 5.1.4 Controle de tensão

Os resultados apresentados até o momento para o sistema IEEE 13 Barras consideram que os dispositivos REDs com conexão monofásica atuam no controle de tensão local das barras em que estão conectados. Dessa forma, tais geradores contribuem ajustam a potência reativa injetada ou absorvida na rede, a fim de controlar a tensão da barra no ponto de conexão, controle denominado *volt-var* pela literatura [18, 19, 70, 71, 72, 73], ao passo que os demais geradores operam com fator de potência unitário, e, portanto, sem contribuição de potência reativa para controle de tensão.

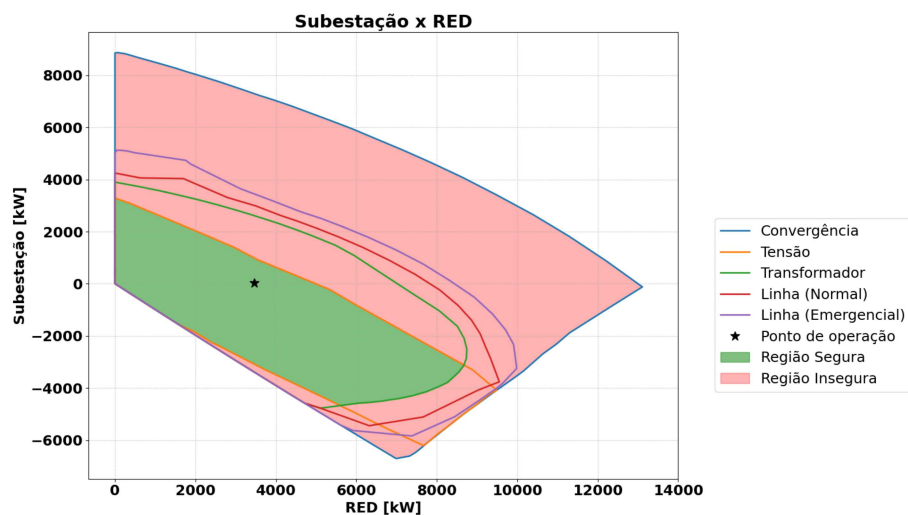
No entanto, o uso do controle *volt-var* pode comprometer a capacidade de entrega de potência ativa por parte de tais fontes, de tal forma que tais dispositivos tendem a operar sem controle de tensão, sob fator de potência unitário, conforme discutido em [19]. A fim de se avaliar o impacto de tal modo de operação para a segurança da operação, fez-se a construção da SSR considerando que todos os REDs operassem com fator de potência unitário, obtendo a região descrita na Figura 45.

Quando se compara a região segura formada com controle de tensão (Figura 38) e a região segura sem controle de Tensão (Figura 45), obtém-se a Figura 46. Pelo nomograma

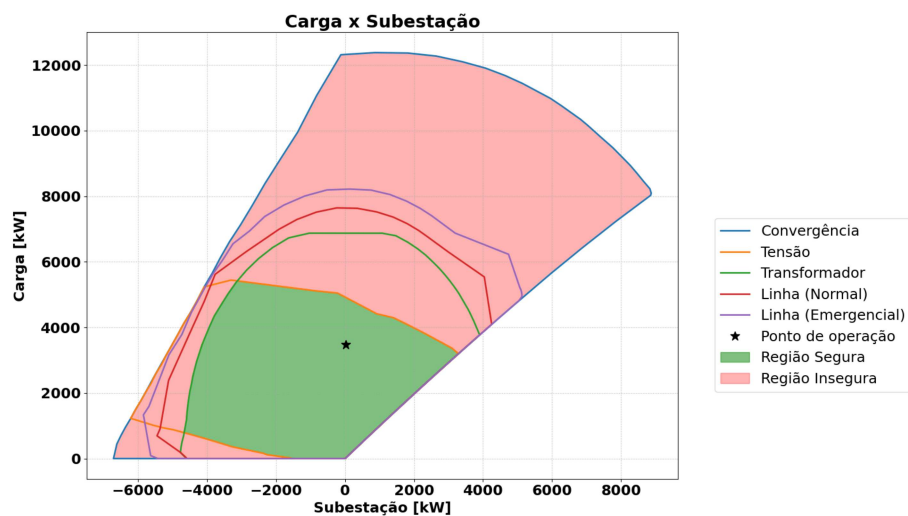
Figura 45 – Região de segurança completa para o sistema IEEE 13 Barras utilizando método tradicional sem controle de tensão.



(a) Carga x RED.



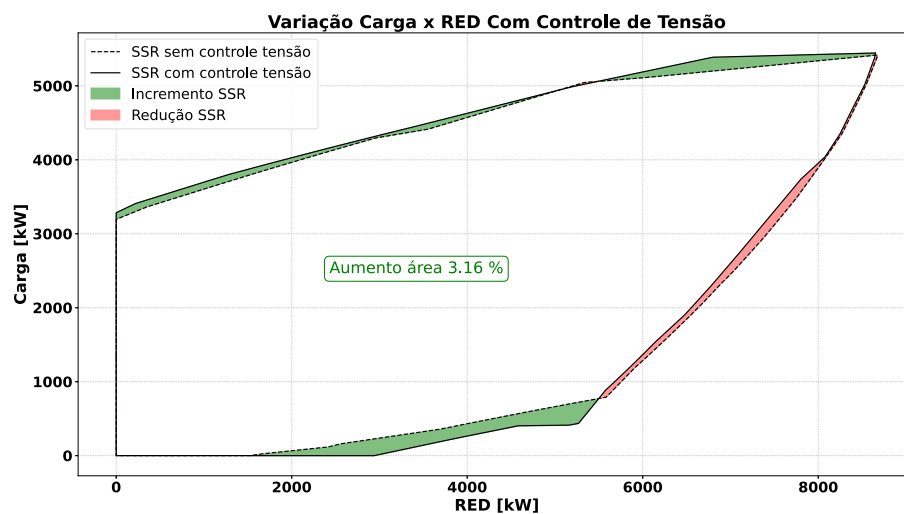
(b) Subestação x RED.



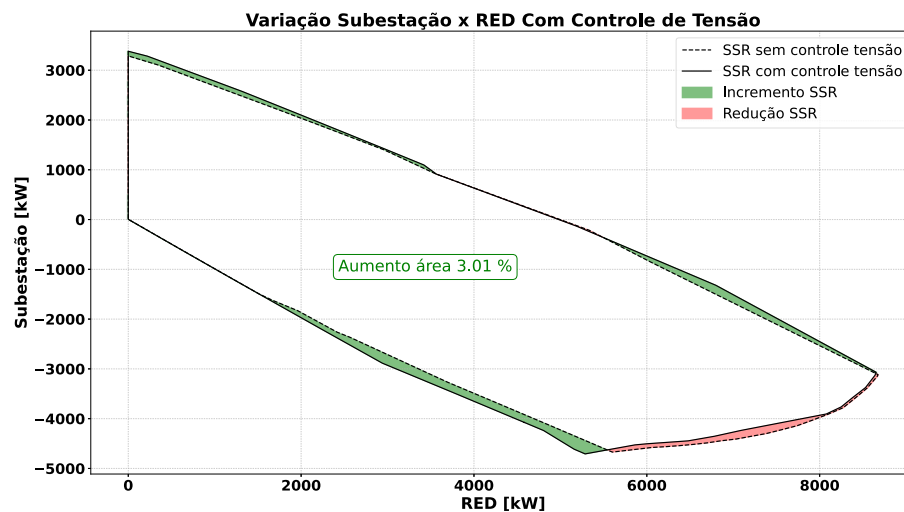
(c) Carga x Subestação

Fonte: Elaborado pelo autor.

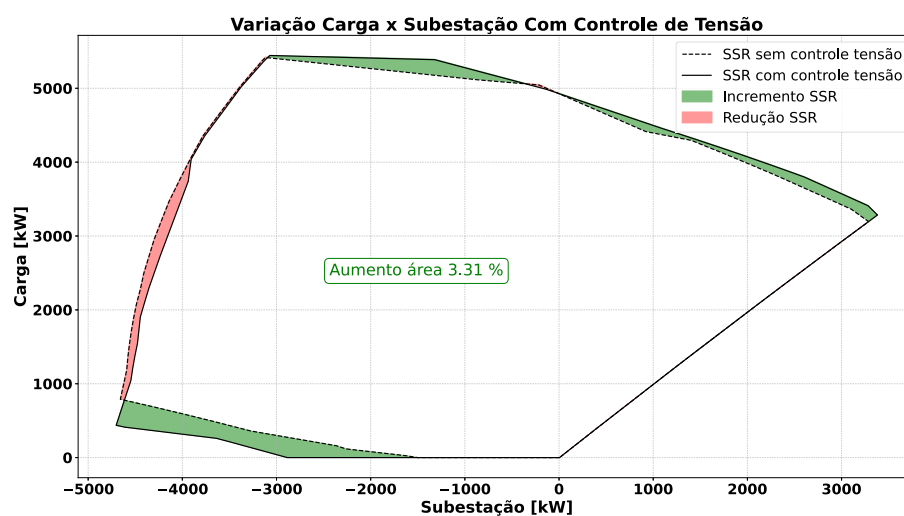
Figura 46 – Impacto do controle de tensão na região de segurança do sistema IEEE 13 Barras.



(a) Carga x RED.



(b) Subestação x RED.



(c) Carga x Subestação

Fonte: Elaborado pelo autor.

46a é possível observar que para uma mesma condição de geração dos REDs, a região segura com controle de tensão contempla uma maior demanda de carga, responsável por ampliar a área da região segura. Também se observa um incremento dessa região em situações de carga leve. Destaca-se que os trechos em que ocorrem o incremento da região segura coincide com os trechos em que a limitação dessa região é o nível de tensão da rede, o que pode ser verificado ao comparar o nomograma 46a com o nomograma 45a, indicando, justamente que, com o suporte de reativo dos REDs, um melhor perfil de tensão é obtido.

Por outro lado, é possível observar que o trecho em que ocorre o decremento da área segura ocorre em regiões de geração elevada dos REDs, onde o limitador da rede passa a ser a potência aparente dos transformadores, conforme avaliado, novamente, na comparação entre os nomogramas 46a e 45a. Isso se deve ao fato de que, para uma mesma potência ativa gerada pelos REDs, no modo de operação com controle *volt-var*, a potência aparente dos REDs é maior, de tal modo que os transformadores atingem seu limite de carregamento.

Por fim, quando se avalia a área total da região segura, o controle de tensão por parte dos REDs é capaz de ampliar área da região segura em cerca de 3%, conforme observado nos nomogramas 46a, 46b e 46c. Diante disso, conclui-se que a atuação do controle de tensão dos REDs é responsável por melhorar o perfil de tensão do sistema, ampliando a faixa de operação em que o sistema mantém tensões adequadas, ao custo de uma maior restrição referente à potência dos transformadores, que, diante de uma maior circulação de potência reativa, ficam mais carregados.

## 5.2 Sistema de distribuição CKT5

### 5.2.1 Descrição sistema

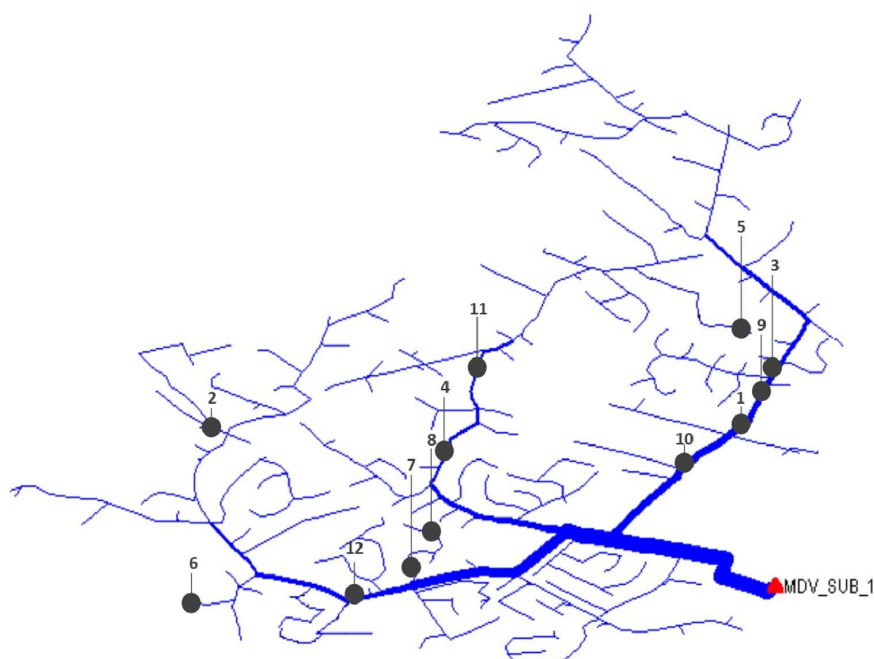
O sistema de distribuição CKT5 é um modelo real de uma rede de distribuição publicado pelo EPRI [88]. Trata-se de uma rede trifásica desequilibrada com extensão aproximada de 77 km, com 2998 barras, 1379 unidades consumidoras, sendo em sua maioria residenciais, e que opera sob tensão de 12,47 kV. Os pontos de geração distribuída estão distribuídos pelo unifilar da rede conforme indicado na Figura 47, tendo uma capacidade instalada de 4200 kW e modelado originalmente com fator de potência unitário. A demanda ativa do sistema é de 7132,8 kW, e o modelo de carga utilizado é o modelo exponencial.

As grandezas monitoradas para construção da SSR são as mesmas do caso anterior, sendo os valores limites ajustados de acordo com a característica do sistema e descritas a seguir.

Destaca-se que, apesar de o sistema apresentar capacidades específicas para os transformadores de distribuição, tais valores são violados na condição original de operação do sistema, inviabilizando a construção da região de segurança e demonstrando que a rede



Figura 47 – Sistema de distribuição CKT5.



Fonte: Extraído de [88].

em questão necessitaria de reforços imediatos para garantir a operação segura.

Entretanto, como o foco deste trabalho é avaliar a construção da região de segurança, e não especificamente avaliar a operação específica do sistema CKT5 em suas condições originais, optou-se por ajustar os parâmetros da rede a fim de viabilizar o processo de construção da região de segurança. Assim, foi ajustada a capacidade dos transformadores de distribuição com base em valores da literatura [89] a fim de que tais equipamentos não violassem o limite de carregamento em condições originais de carregamento e geração dos REDs. Dito isto, todas as análises apresentadas em diante fazem referência à rede CKT5 como a rede que já apresenta os parâmetros modificados.

- Faixa de tensão adequada: 0,95 a 1,05 por unidade (p.u.);
- Potência aparente do transformador da subestação: 10 MVA;
- Potência aparente dos transformadores de distribuição: 50 kVA (Valor de referência extraído de [89]);
- Limite de corrente nas linhas sob condição normal: Específico da modelagem do equipamento;
- Limite de corrente nas linhas sob condição emergencial: Específico da modelagem do equipamento.

### 5.2.2 Metodologia Tradicional

A construção da SSR para o sistema CKT5 foi feita utilizando um número total de 72 direções de busca, um número inferior ao que foi utilizado no sistema IEEE 13 Barras devido ao maior esforço computacional que o sistema CKT5 exige para resolução do fluxo. A partir disso, chegou-se na SSR apresentada na Figura 48, onde são exibidos os nomogramas referentes a tal região. Ainda que utilizando um menor número de direções do que sistema anterior, o tempo de construção da região é significativamente superior ao caso IEEE 13 Barras, tendo em vista que o tempo de resolução de cada fluxo de potência é dezena de vezes superior. Ao final do processo foram executados 3933 fluxos de potência em um tempo de 3047,94 segundos.

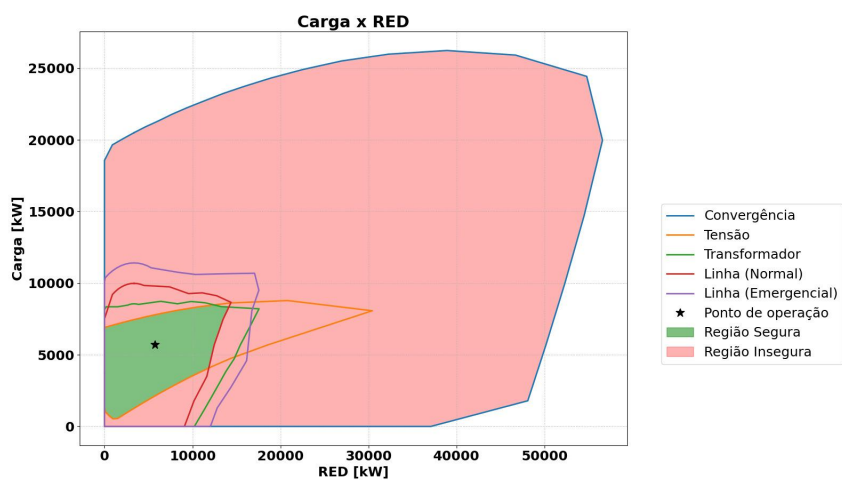
Avaliando o nomograma 48a, é possível observar que a região de segurança é limitada, em sua maior parte, pelo limite de tensão nas barras (curva em laranja). Em condição de geração dos REDs elevada, observa-se que a limitação passa a ser o carregamento das linhas em condição normal (curva em vermelho) e, particularmente, para a condição em que a carga e a geração dos REDs estão elevados, existe uma limitação por parte dos transformadores da região (curva em verde).

Sob o ponto de vista exclusivo do carregamento nas linhas, é possível observar que existe uma margem considerável de potência na qual o sistema consegue operar em sobrecarga para uma situação emergencial, ou seja, uma período de tempo limitado na qual as linhas podem operar com um carregamento mais elevado que a condição normal de operação, sem que isso implique uma redução de sua vida útil. Essa margem pode ser vista pela faixa delimitada entre as curvas em roxo e em vermelho, que representam respectivamente os limites das linhas em condição de emergência e condição normal. Porém nesses cenários, tanto as tensões nas barras quanto o carregamento de transformadores podem estar sob condições inseguras e que, portanto, inviabilizariam a operação.

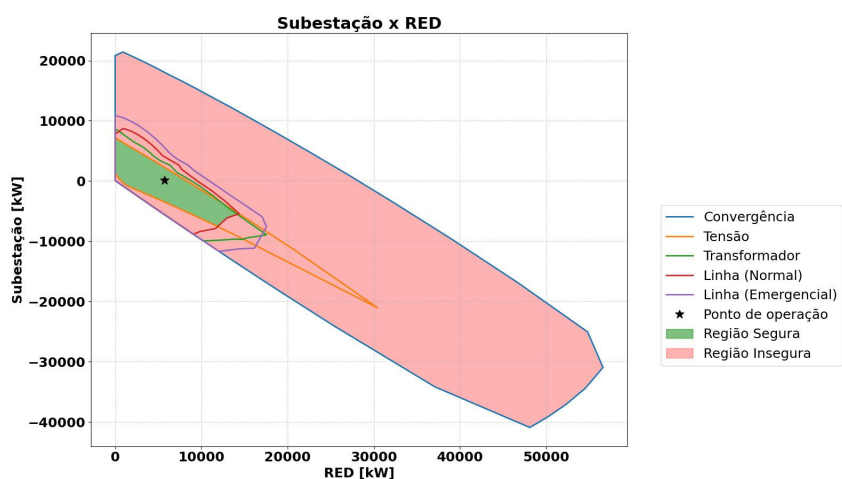
Pelo nomograma 48c é possível observar que os cenários de sobrecarga das linhas ocorrem, exclusivamente, em condições de geração elevada dos REDs que geram um fluxo de potência reverso na rede, ou seja, casos em que geração dos REDs é superior à demanda das cargas de tal forma que a potência passa a fluir em direção à SE. De tal forma que, um dos reforços necessários no sistema em questão para garantir a ampliação dos REDs de forma segura, seria a ampliação da capacidade das linhas de distribuição. Porém em condições inferiores de geração dos REDs, a limitação do sistema torna-se a tensão nas barras, indicando que a ampliação da margem de segurança do sistema necessariamente passaria por investimentos em suporte de tensão.

Na sequência, na Figura 49, é apresentado a variação da área segura de acordo com o número de direções de busca investigado. É possível ver como a área da região segura aumenta da configuração inicial, com 24 direções de busca, onde a área do nomograma 49a

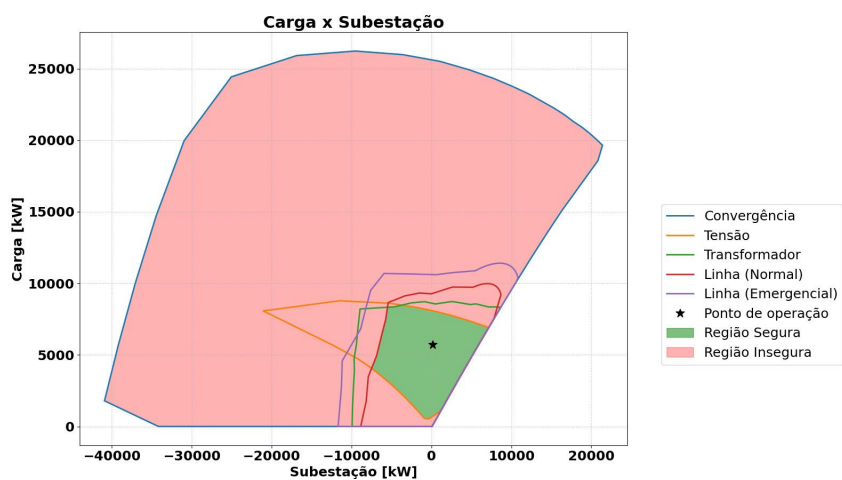
Figura 48 – Região de segurança completa para o sistema CKT5 Barras utilizando método tradicional.



(a) Carga x RED.



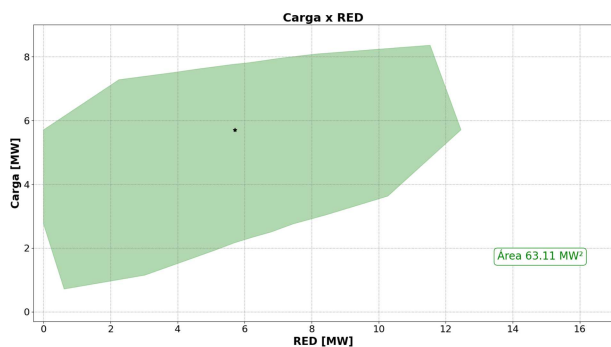
(b) Subestação x RED.



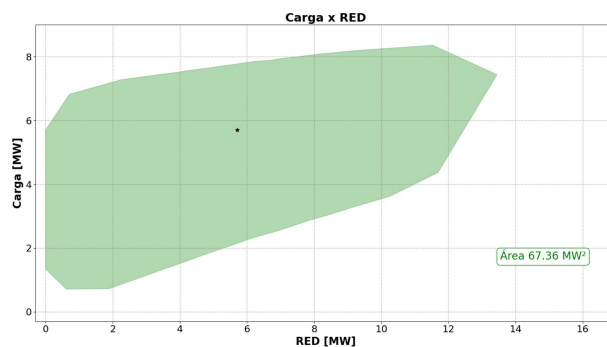
(c) Carga x Subestação

Fonte: Elaborado pelo autor.

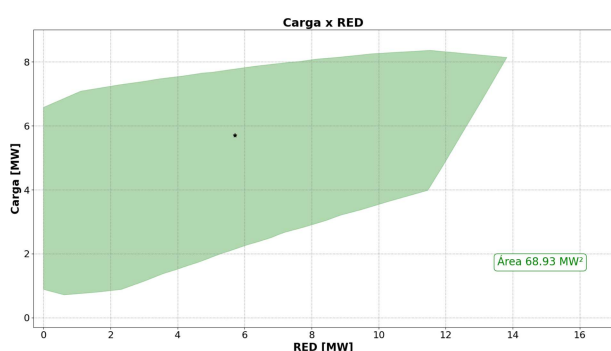
Figura 49 – Variação da região de segurança sistema CKT5 com o número de direções na metodologia tradicional.



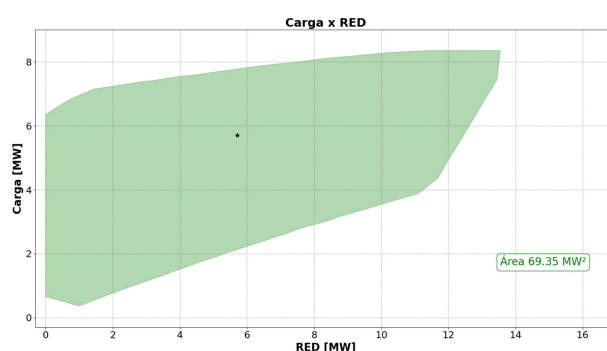
(a) 24 direções.



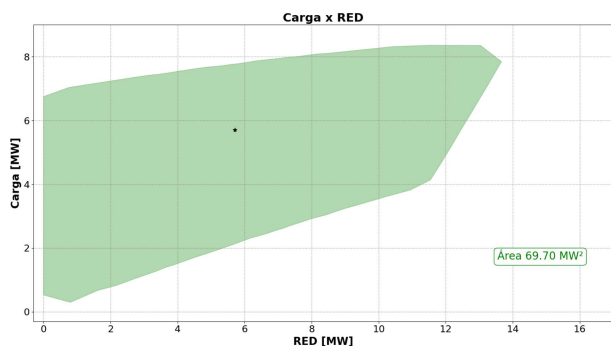
(b) 48 direções.



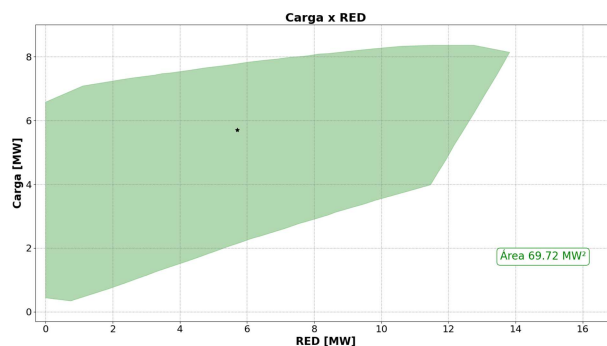
(c) 72 direções.



(d) 96 direções.



(e) 120 direções.



(f) 144 direções.

Fonte: Elaborado pelo autor.

é de  $63,11 \text{ MW}^2$ , até o nomograma 49f com 144 direções, onde a área é de  $69,72 \text{ MW}^2$ . Nesse processo, melhora-se significativamente os limites da região segura, em especial para cenários de geração dos REDs próximos a zero, e cenários com geração superior a 12 MW. Destaca-se que a medida que o número de direções de busca aumenta, a área da região segura também tende a crescer, sendo esse crescimento mais expressivo nos casos com número reduzido de direções, ou seja, o crescimento relativo da área é maior entre os casos com 24 e 48 direções do que entre os casos de 120 e 144 direções.

A Tabela 7 descreve o esforço computacional demandado para a construção exclusiva da região segura do sistema CKT5. Quando comparada à Tabela 5 é possível notar que a

ordem de grandeza do número de fluxos resolvidos se mantém a mesma, entretanto, devido a maior complexidade do sistema CKT5 em relação ao sistema IEEE 13 Barras, o tempo de solução aumenta na ordem de dezenas de vezes.

Tabela 7 – Fluxos resolvidos para sistema CKT5 com metodologia tradicional.

Direções de busca	Fluxos resolvidos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [s]
24	281	63,11	661,63
48	565	67,36	1267,70
72	830	68,93	2170,34
96	1126	69,35	2378,58
120	1390	69,70	3007,87
144	1664	69,72	3557,40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que a área da região segura para os casos de 120 e 144 direções de busca é bem próxima, enquanto que o número de fluxos resolvidos e, conseqüentemente, o tempo gasto na simulação são significativamente superiores no caso de 144 direções. Tal fato é um indicativo que, para o sistema em questão, casos com um número de direções de busca superiores a 120 tendem a apresentar um esforço computacional desnecessário, uma vez que demandam um número adicional de fluxos de potência para resolução, sem uma significativa melhora na área da região avaliada, e portanto, devem ser evitados.

### 5.2.2.1 Processamento Paralelo

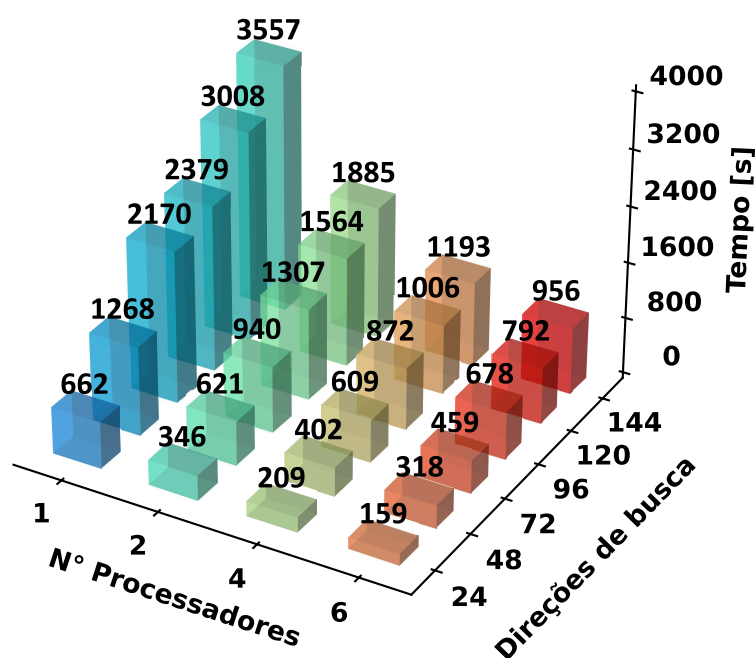
Tendo em vista o elevado tempo computacional demandado para o processamento da região de segurança observado na Tabela 7, a estratégia de processamento paralelo se faz importante. A Figura 50 mostra a redução do tempo de processamento de acordo com o número de processadores dedicados à simulação. Em média, o uso de 2 processadores reduz o tempo de processamento em 49%, 4 processadores em 67% e 6 processadores em 74%.

### 5.2.3 Metodologia PSO

Para construir a SSR completa utilizando o método PSO, ou seja, traçando os limites de cada variável monitorada, foram utilizadas 48 partículas e resolvidos 4398 fluxos de potência em um tempo total de processamento de 3070,41 segundos. A Figura 51 mostra a região de segurança construída. O uso de um número reduzido de partículas em relação aos demais casos citados é justificado por uma limitação do *hardware* utilizado, tendo em vista o alto esforço computacional exigido.

Assim como exibido na seção 5.2.2, os limitadores da região segura para esse sistema são a tensão (curva em laranja), o carregamento das linhas em condição normal (curva em

Figura 50 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema CKT5 utilizando processamento paralelo e metodologia tradicional.



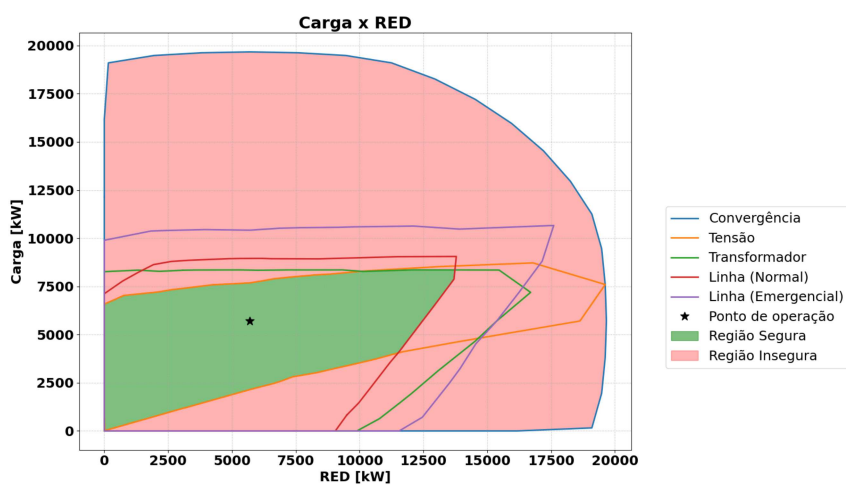
Fonte: Elaborado pelo autor.

vermelho) e a capacidade dos transformadores (curva em verde). De modo geral, os limites da Figura 51 se assemelham aos limites do método tradicional, representado na Figura 48. A principal diferença está no limite de convergência (curva em azul), na qual se observa um limite mais restritivo, sendo justificada pelo número reduzido de partículas utilizado e também pelo limite do número máximo de iterações do método.

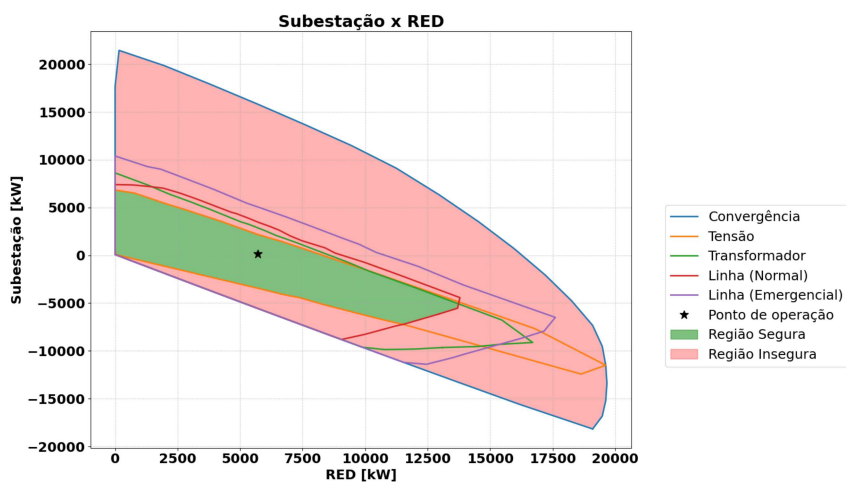
Destaca-se, novamente, que as configurações e estrutura do método PSO foram ajustadas para construção da área segura, não sendo, portanto, otimizadas para o cálculo dos limites individualmente. Neste caso, exibiu-se a região completa, com todos os limites monitorados, apenas com o intuito de comparação com a apresentada na seção 5.2.2. Com relação às limitações da rede em questão, valem-se os mesmos pontos já abordados na referida seção.

Na sequência, exibe-se, na Figura 52, uma visão qualitativa de como o limite da região segura varia em função do número de partículas utilizadas no método. A configuração do PSO utilizada para esta simulação foi a mesma descrita na seção 5.1.3. De modo geral, o perfil da região segura é semelhante entre os nomogramas da Figura 52, sendo refinada o contorno da região de acordo com o aumento do número de partículas.

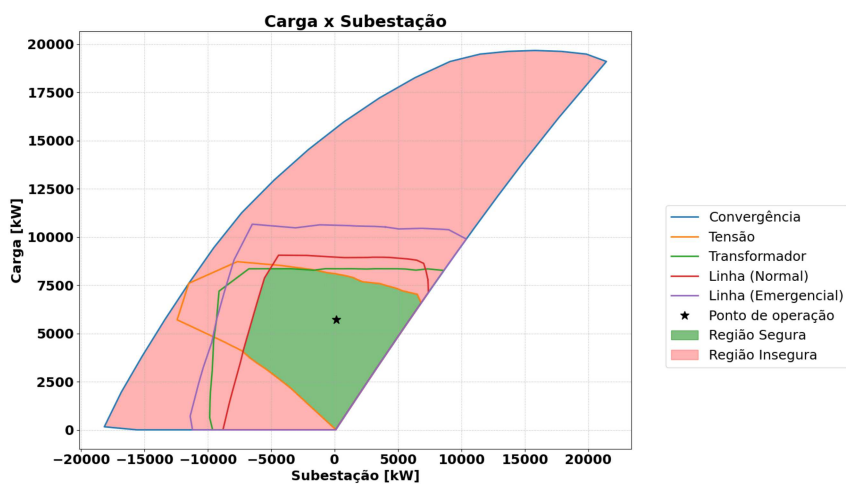
Figura 51 – Região de segurança completa para o sistema CKT5 Barras utilizando método PSO.



(a) Carga x RED.



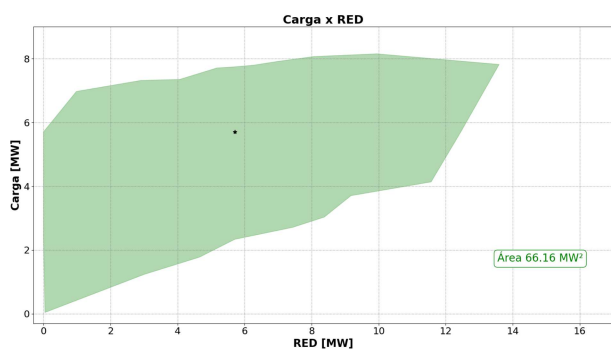
(b) Subestação x RED.



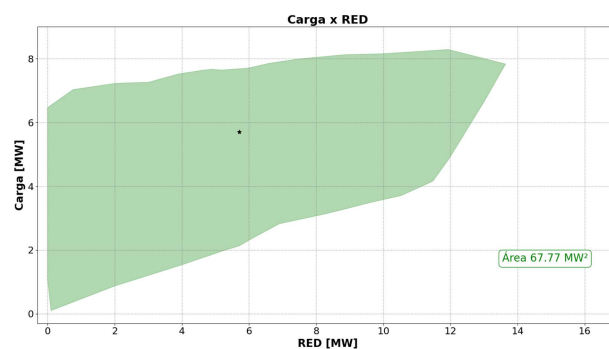
(c) Carga x Subestação

Fonte: Elaborado pelo autor.

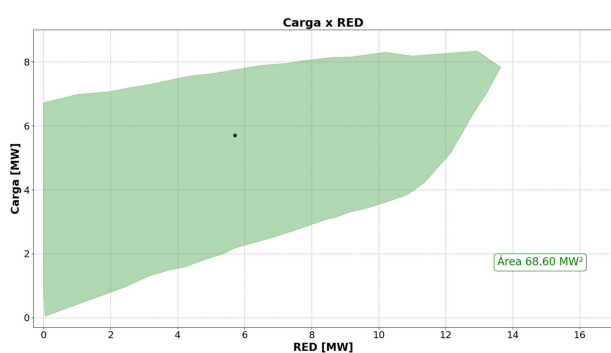
Figura 52 – Variação qualitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema CKT5.



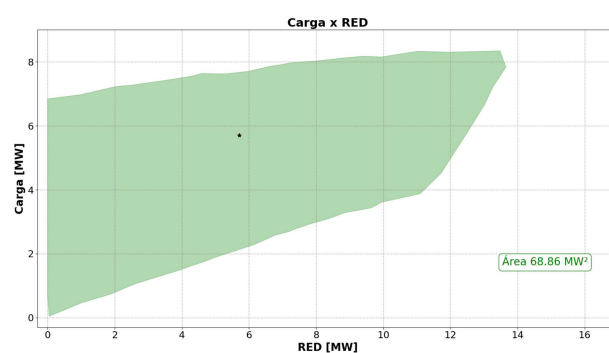
(a) 24 partículas.



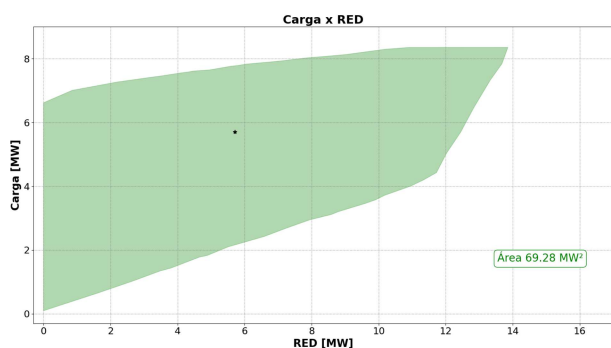
(b) 48 partículas.



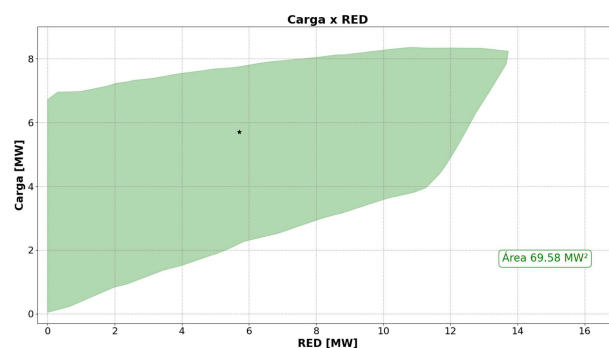
(c) 72 partículas.



(d) 96 partículas.



(e) 120 partículas.



(f) 144 partículas.

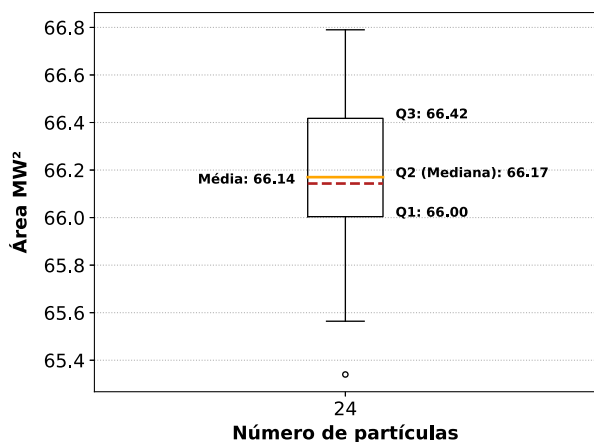
Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém, o nomograma 52a já seria uma boa estimativa para os limites da região segura.

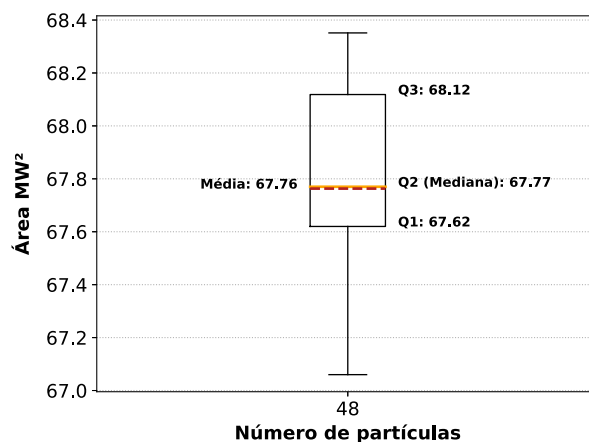
Lembrando que, devido à estocasticidade do método, cada simulação gerada obterá um resultado diferente. De modo que, para estabelecer uma comparação quantitativa com os resultados da metodologia tradicional, é feita uma análise estatística dos resultados obtidos, sendo feitas 10 simulações para arranjo de partícula. Os resultados são apresentados na Figura 53. De acordo com o esperado, a medida que o número de partículas aumenta, elevam-se os valores das áreas obtidas na construção da região, provocando a elevação da média e dos quartis.



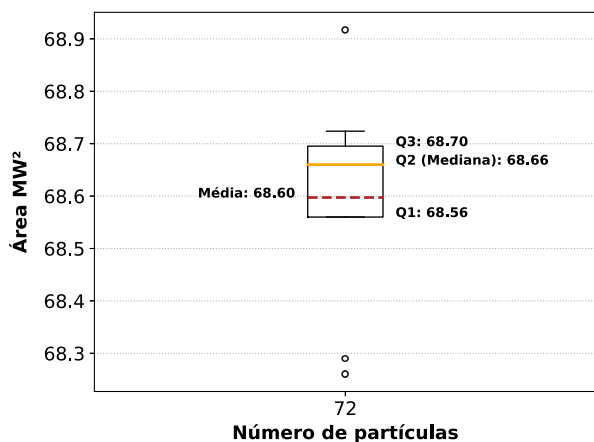
Figura 53 – Variação quantitativa da região de segurança com o número de partículas na metodologia PSO para o sistema CKT5.



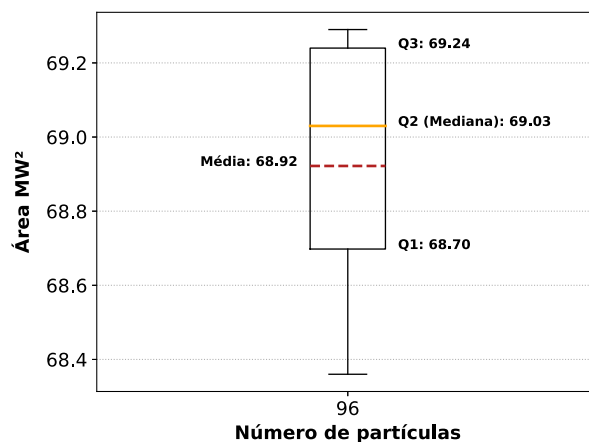
(a) 24 partículas.



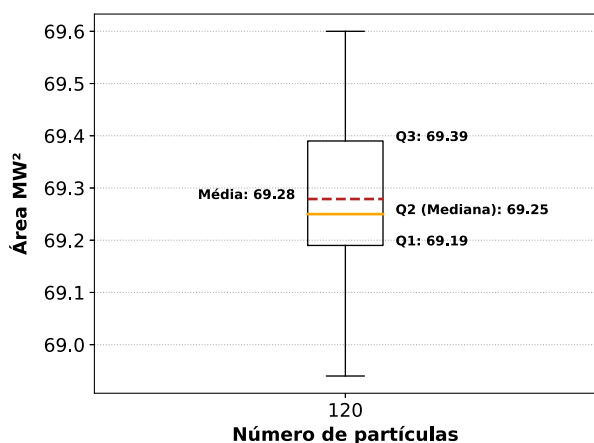
(b) 48 partículas.



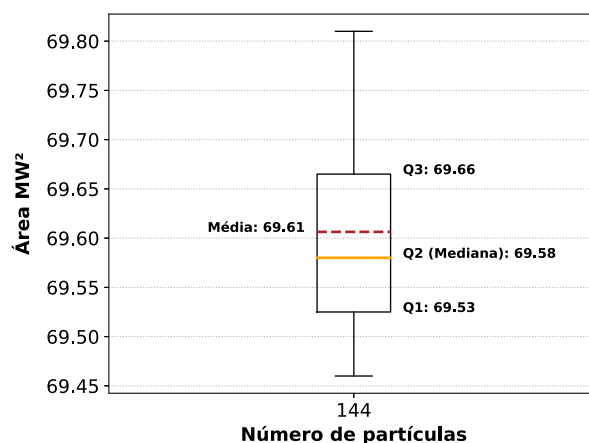
(c) 72 partículas.



(d) 96 partículas.



(e) 120 partículas.



(f) 144 partículas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 informa a média do tempo gasto e do número de fluxos de potência resolvidos para cada conjunto de partículas avaliado durante a construção da região segura

exclusivamente. Destaca-se um tempo significativamente superior àquele obtido para o sistema IEEE 13 Barras, tendo em vista a maior complexidade do sistema CKT5. Neste caso, para a configuração de 144 partículas, o tempo de processamento é acima de uma hora. A análise conjunta da Tabela 8 com a Figura 52 permite avaliar qual a melhor configuração de PSO de acordo com o interesse do usuário. Caso seja necessário uma estimativa inicial da margem de segurança do sistema, sem a necessidade de uma precisão elevada nos valores de potência referente ao limite de segurança, a configuração com 24 partículas fornece uma boa estimativa da região em um tempo significativamente reduzido em 12 minutos. Entretanto, se houver necessidade de uma maior precisão na especificação da margem de segurança, configurações com um número superior de partículas fornecem uma solução com maior qualidade, porém mediante um aumento significativo de tempo de processamento.

Tabela 8 – Fluxos resolvidos para sistema CKT5 com metodologia PSO.

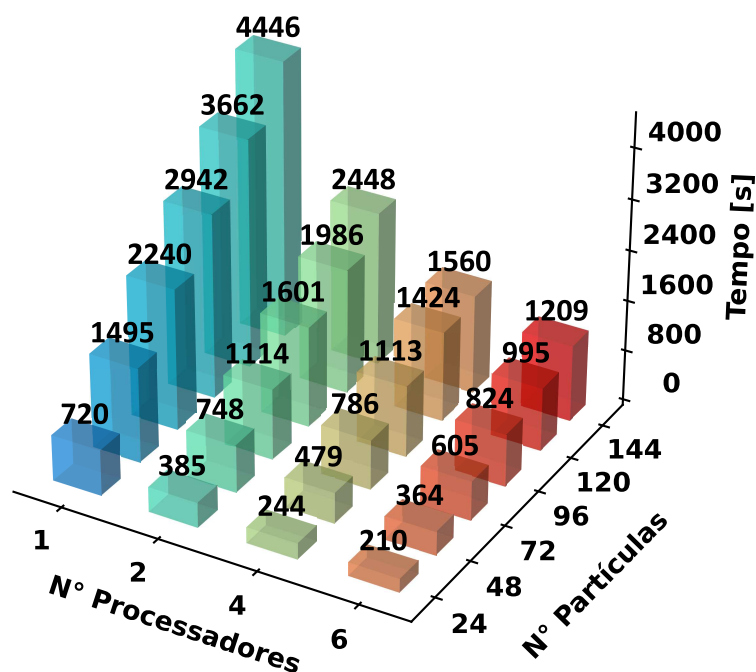
Número de partículas	Fluxos resolvidos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [s]
24	374	66,14	720,00
48	735	67,76	1495,40
72	1105	68,60	2239,82
96	1487	68,92	2941,78
120	1854	69,28	3661,87
144	2259	69,61	4445,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.3.1 Processamento Paralelo

Como pode ser visto na Tabela 8, a construção da SSR utilizando o processamento serial pode chegar até a escala de hora, evidenciando o esforço computacional demandando pelo processo. Assim, mostra-se na Figura 54 como o processamento paralelo é capaz de reduzir esse tempo, de até uma hora, em alguns minutos. Utilizando 2, 4 e 6 processadores, observam-se reduções de 47%, 64% e 73% no tempo de processamento do método. Dessa forma, torna-se crucial para construção de regiões de segurança em tempos reduzidos, o uso da técnica de processamento paralelo.

Figura 54 – Variação do tempo de construção da SSR para o sistema CKT5 utilizando processamento paralelo e metodologia PSO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3 Comparação dos métodos

Esta seção tem como objetivo comparar os resultados obtidos pelos métodos tradicional e o método PSO para os sistemas IEEE 13 Barras e CKT5. As comparações serão baseadas no perfil da região de segurança construído, na área dessa região e no tempo de processamento do método, destacando as vantagens e desvantagens de cada método.

Inicialmente, compara-se os perfis das regiões formadas para cada conjunto de partículas e direções de busca. A Figura 55 faz a comparação entre o contorno da região segura dos nomogramas apresentados nas Figuras 39 e 42 para o sistema IEEE 13 Barras. Nota-se que a medida que o número de indivíduos (direções de busca ou partículas) aumenta, o perfil da região segura gerado pelos dois métodos tende a se aproximar.

Entretanto, no caso com 24 indivíduos representado no nomograma 55a, o método PSO é significativamente superior ao método tradicional, em especial, na definição do limite da região segurança nas condições próxima a origem dos eixos do nomograma. Isso se deve ao fato de que, no método PSO, diferentemente do método tradicional, os incrementos de potência no ponto de operação não precisam seguir uma trajetória com direção fixa, ou seja, durante a busca pela maximização da margem de segurança, pode-se

alterar a proporção em que a potência no eixo das abscissas e ordenadas são ajustadas, dando flexibilidade para que o método, ao encontrar o limite de determinado eixo, possa ainda continuar ajustando a potência no outro eixo do nomograma e com isso, aumentar a distância em relação ao ponto inicial de operação. No método tradicional, tais incrementos de potência são fixos, mantendo sempre a mesma proporção de variação na potência entre os eixos para uma determinada direção de busca. Assim, para que a metodologia tradicional seja capaz de reproduzir bem os limites da região segura próximos a origem do sistema, é necessário uma escolha adequada do número de direções de busca. Essa mesma descrição, apesar de ser exemplificada na margem de segurança próxima a origem dos eixos do nomograma também é válida para as demais extremidades da região, o que justifica no nomograma 55a a melhor representação da margem de segurança e a maior área obtida.

A mesma análise pode ser feita para os resultados obtidos durante a construção da SSR do sistema CKT5. A Figura 56 faz a comparação dos nomogramas apresentados nas Figuras 49 e 52. Nesse caso, fica ainda mais evidente o que foi descrito anteriormente associado à flexibilidade do método PSO no ajuste de potência ao longo do método iterativo.

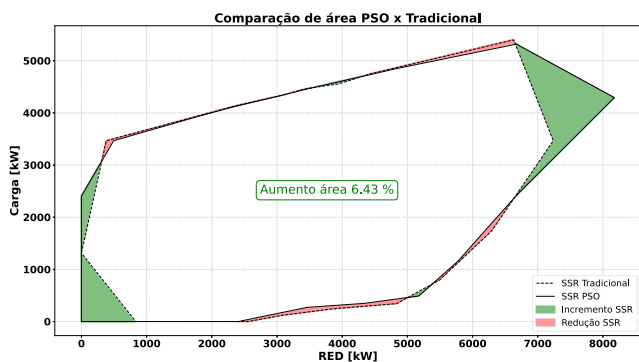
No nomograma 56a, as extremidades da região convexa são justamente os pontos nos quais o método PSO é capaz de encontrar uma maior margem de segurança do sistema, levando a um incremento da área da região segura. No entanto, a medida que o número de indivíduos aumenta, a metodologia tradicional, por investigar diversas direções de busca, consegue reproduzir melhor os limites da região, mas ainda de uma maneira menos precisa que o método PSO, conforme pode ser observado no nomograma 56f, onde mesmo com 144 direções de busca, o método ainda é incapaz de localizar pontos seguros próximos a origem do sistema.

Entretanto, é muito improvável que o sistema de distribuição opere em um ponto próximo a origem dos eixos do nomograma, de forma que a limitação do método tradicional em reproduzir tais pontos específicos pode não representar um prejuízo real na aplicação do método.

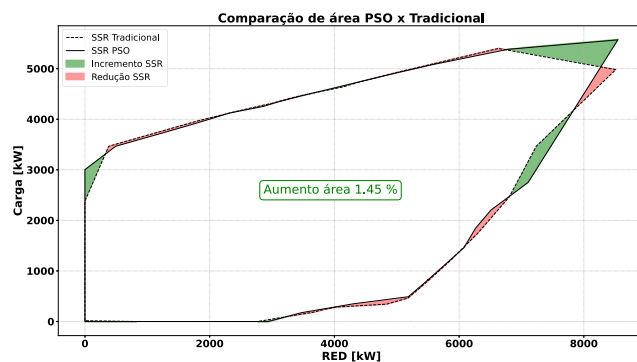
Na sequência, as Tabelas 9 e 10 fazem uma comparação associada ao tempo de processamento do método para cada método, de acordo com os resultados obtidos para os sistemas IEEE 13 Barras e CKT5, respectivamente. Além disso, faz-se uma comparação das áreas das regiões seguras obtidas em cada método, sendo um critério que avalia a qualidade da região formada.

O que se observa em ambos os sistemas simulados é que o número de fluxos resolvidos no método PSO é cerca de 27% superior ao método tradicional. Isso se deve ao processo de estabilização do método próximo ao limite da região segura. Foi observado que o método tradicional, durante o processo de redução do passo de potência, é capaz encontrar o limite de uma determinada direção de busca de forma mais ágil do que o

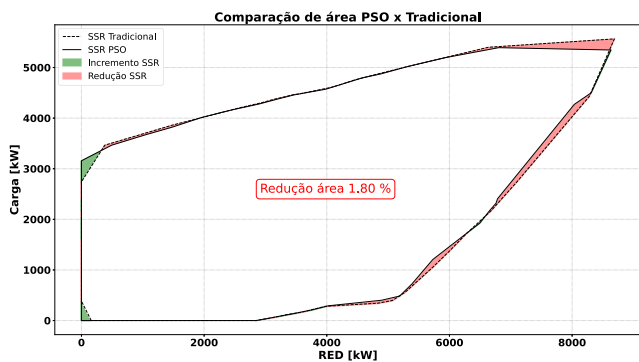
Figura 55 – Diferença entre contorno da região segura entre os métodos PSO e Tradicional para o sistema IEEE 13 Barras.



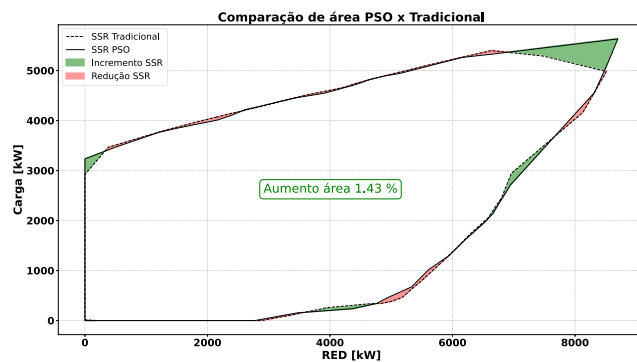
(a) 24 partículas x 24 direções.



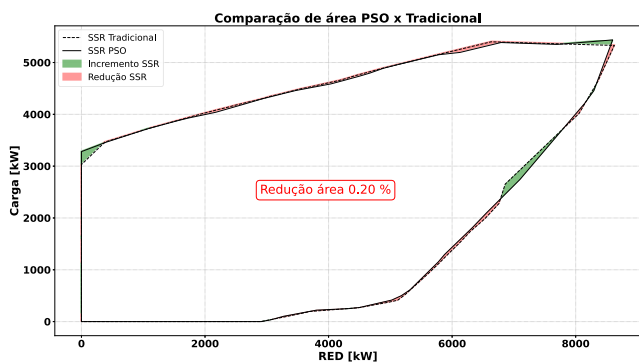
(b) 48 partículas x 48 direções.



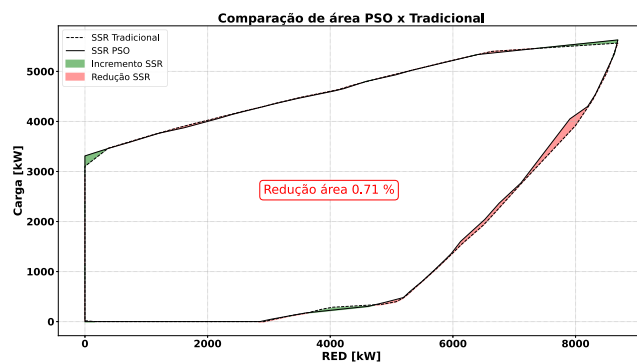
(c) 72 partículas x 72 direções.



(d) 96 partículas x 96 direções.



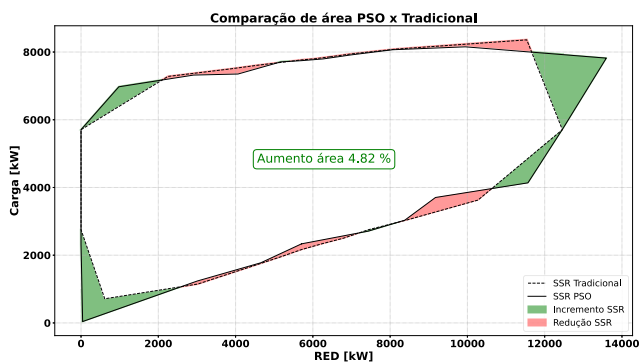
(e) 120 partículas x 120 direções.



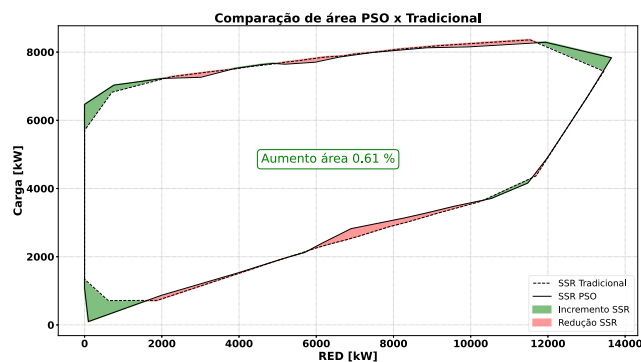
(f) 144 partículas x 144 direções.

Fonte: Elaborado pelo autor.

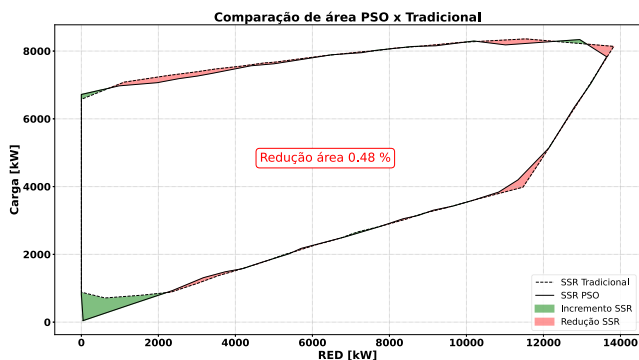
Figura 56 – Diferença entre contorno da região segura entre os métodos PSO e Tradicional para o sistema CKT5.



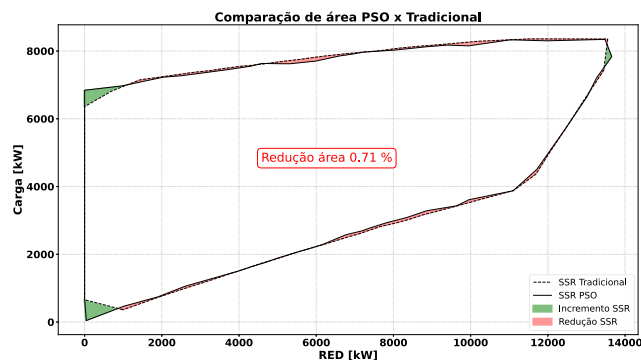
(a) 24 partículas x 24 direções.



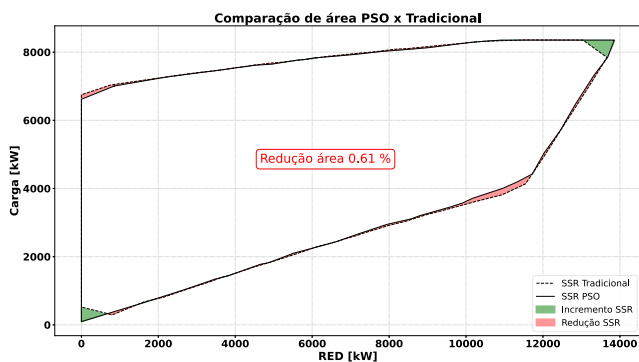
(b) 48 partículas x 48 direções.



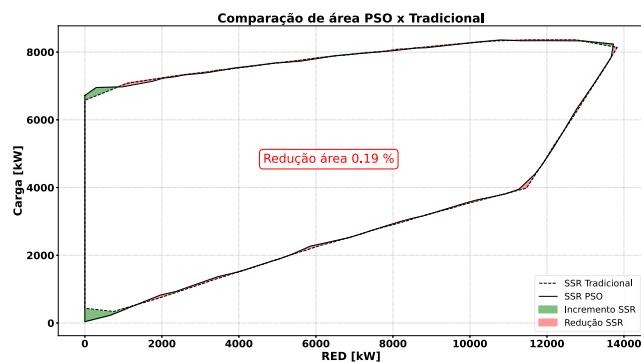
(c) 72 partículas x 72 direções.



(d) 96 partículas x 96 direções.



(e) 120 partículas x 120 direções.



(f) 144 partículas x 144 direções.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Comparação metodologia tradicional e PSO sistema IEEE 13 Barras.

Indivíduos	Tradicional			PSO		
	Fluxos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [ $s$ ]	Fluxos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [ $s$ ]
24	291	26,60	7,12	374	27,87	20,28
48	609	29,26	14,79	734	29,62	37,76
72	904	30,52	21,58	1062	29,86	58,49
96	1198	29,85	29,38	1444	30,20	71,72
120	1491	30,35	38,00	1820	30,25	91,73
144	1815	30,74	42,29	2151	30,37	108,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Comparação metodologia tradicional e PSO sistema CKT5.

Indivíduos	Tradicional			PSO		
	Fluxos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [ $s$ ]	Fluxos	Área [ $MW^2$ ]	Tempo [ $s$ ]
24	281	63,11	661,63	374	66,14	720,00
48	565	67,36	1267,70	735	67,76	1495,40
72	830	68,93	2170,34	1105	68,60	2239,82
96	1126	69,35	2378,58	1487	68,92	2941,78
120	1390	69,70	3007,87	1854	69,28	3661,87
144	1664	69,72	3557,40	2259	69,61	4445,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

método PSO. A estratégia utilizada pelo método tradicional de reduzir o passo de potência até uma tolerância mínima faz com o que o método encontre o limite da região segura em um número reduzido de iterações quando comparado ao método PSO, que ao se aproximar do limite de segurança, oscila entre soluções seguras e inseguras até atingir o número máximo de iterações do método ou atingir a estagnação de sua função objetivo. Como consequência desse fato, o tempo total de processamento para o método PSO é, em média, 20% superior ao método tradicional.

Quando se avalia a área da região formada, tal como visto nas Figuras 55 e 56, as diferenças são mais significativas nas configurações com um número reduzido de indivíduos, sendo o método PSO melhor representativo da margem de segurança da rede nesse cenário, ainda que com um maior tempo de processamento. Já para um número maior de indivíduos, a tendência é que os métodos apresentem resultados semelhantes, com o método tradicional apresentando áreas sutilmente maiores.

No caso em particular do sistema IEEE 13 Barras, como o tempo de processamento é reduzido, é mais vantajoso utilizar o método tradicional, uma vez que, por mais que o método PSO seja eficaz para reproduzir a região segura com um número reduzido de

partículas, o tempo gasto para o processamento com 24 partículas é praticamente igual ao tempo gasto pelo PSO para construir a região utilizando 72 direções. Sendo que neste caso, a qualidade da região formada pelo método tradicional com 72 direções de busca é superior ao PSO com 24 partículas.

Entretanto, para a análise do sistema CKT5, em que os tempos de solução em geral são elevados, a metodologia PSO será vantajosa quando se deseja uma estimativa inicial da região de segurança com uma qualidade aceitável e um tempo de processamento não tão elevado.



## 6 CONCLUSÕES

A compreensão dos equipamentos e limites que restringem a operação segura de um determinado sistema de distribuição é fundamental para garantir sua operação e expansão de forma adequada. Nesse contexto, o estudo da região de segurança permite avaliar o quão seguro um determinado ponto de operação é, de acordo sua distância do limite da região segura, sendo uma ferramenta importante para estudos elétricos.

Sob o âmbito da operação, o conhecimento da região de segurança permite auxiliar quais ações poderiam ser tomadas no contexto da operação para garantir que um ponto seguro tenha uma margem de segurança adequada, ou mesmo para trazer um ponto de operação que esteja operando em uma zona insegura, para a região segura. Já sob âmbito da expansão do sistema, ao se determinar os equipamentos, a exemplo de linhas ou transformadores, ou ainda características operativas, como sobre ou subtensões na rede, que limitam a operação segura do sistema, tem-se um direcionamento de quais devem ser os reforços adequados na rede a fim de ampliar sua região de segurança, tendo em vista que nem é qualquer investimento na infra-estrutura da rede que irá ampliar a região segura de operação.

Destacada a importância da região de segurança para sistemas elétricos, neste trabalho foram apresentadas e desenvolvidas duas metodologias para construção de região de segurança para sistemas de distribuição, utilizando a linguagem de programação *Python* e integrada ao *software* OpenDSS. A primeira delas, definida como metodologia tradicional, inspirada na metodologia já difundida para sistemas de transmissão de energia elétrica, se mostra eficiente para construção de regiões de segurança. A segunda, baseada na técnica de otimização por enxame de partículas, e por isso definida como metodologia PSO, se mostra eficaz na construção da região de segurança, tendo um melhor desempenho que a metodologia tradicional em situações específicas. Entretanto, o maior tempo de processamento demandando pela metodologia PSO tornam sua aplicação restrita a casos específicos quando comparado à metodologia tradicional.

Para ambas as metodologias propostas, foi evidenciado como o uso de processamento paralelo é capaz de agilizar o processo de construção da região de segurança. Foram obtidos reduções superiores a 70% do tempo se comparado ao processamento serial. Dessa forma, o uso desse tipo de solução em estudos de região de segurança mostra-se muito importante para garantir que o resultado seja gerado de forma ágil.

Por fim, a aplicação do estudo de região de segurança em sistemas de distribuição pode ser utilizado como insumo para outros estudos elétricos, a fim de otimizar a operação do sistema com os recursos já existentes. Nesse sentido, foi apresentado como a prestação de serviços ancilares por parte da geração distribuída, mediante suporte de potência reativa de seus inversores para controle de tensão, é capaz de ampliar a margem de segurança do

sistema.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Em prosseguimento ao que foi elaborado neste trabalho, e visualizando o potencial de aplicação da região de segurança no âmbito de estudos elétricos, bem como as dificuldades enfrentadas neste trabalho, sugere-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- i.* Evolução da metodologia proposta para avaliação da região de segurança sob critério de contingência N-1;
- ii.* Desenvolvimento de um modelo híbrido que una a flexibilidade do método PSO nas iterações iniciais com a eficácia do método tradicional;
- iii.* Análise da metodologia proposta em sistemas de distribuição com características diferentes das redes analisadas neste trabalho (sistemas malhados por exemplo);
- iv.* Reprodução da metodologia apresentada utilizando *clusters*;
- v.* Análise da inserção de outros REDs, a exemplo de veículos elétricos ou baterias, na região de segurança.
- vi.* Análise da variação da região de segurança mediante inserção de dispositivos de manobra que permitam transferência de carga entre alimentadores.
- vii.* Desenvolvimento de inteligência artificial para análise da região de segurança em tempo real;

## REFERÊNCIAS

- [1] CHANGE, U. N. C., “Sharm el-Sheikh Climate Change Conference - November 2022”, Disponível em: <https://unfccc.int/cop27>.
- [2] 21<sup>a</sup> CONFERÊNCIA DAS PARTES, “Acordo de Paris à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Paris, 2015.” Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf).
- [3] UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE, “Glasgow Climate Pact”, Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021\\_10\\_add1\\_adv.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf).
- [4] PETER SCHLOSSER, “After COP27, all signs point to world blowing past the 1.5 degrees global warming limit – here’s what we can still do about it.” Disponível em: <https://theconversation.com/after-cop27-all-signs-point-to-world-blowing-past-the-1-5-degrees-global-warming-limit-heres-what-we-can-still-do-about-it-195080>.
- [5] EPE, “Plano Nacional de Energia 2050”, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>.
- [6] DE CASTRO, N. J., “IMPLICAÇÕES DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA A MATRIZ ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO”, *A geopolítica da energia do século XXI*, 2021.
- [7] MACHADO, S., OTHERS, “Análise do mercado de energia elétrica brasileiro para aplicação da arquitetura blockchain: um estudo para fomentar a digitalização, a descentralização e a descarbonização do setor elétrico”, 2021.
- [8] EPE, “bp Statistical Review of World Energy 2022”, Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.
- [9] IEA, “World Energy Outlook 2022”, 2022.
- [10] EPE, “Balanço Energético Nacional 2022”, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>.
- [11] ENERGIA, C., “Solar passa eólica e é segunda maior fonte no Brasil”, Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53234514/energia-solar-se-torna-a-segunda-maior-fonte-na-matriz-eletrica-brasileira>.
- [12] DA UNIÃO, D. O., “Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022”, Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>.
- [13] EPE, “Plano Decenal de Expansão de Energia 2031”, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>.
- [14] LOPES, C. A. B., *Mobilidade Elétrica: O contributo dos veículos elétricos para a descarbonização do setor de transporte, em Portugal*, Ph.D. Thesis, 2022.

- [15] RIBEIRO FURTADO DE MENDONCA, T., “A distributed control and coordination strategy based on voltage sensitivity for network management”, 2019.
- [16] GARCIA, T. R., LEÃO, F. B., BARRADAS, H. M., “Metodologia para reparametrização adaptativa do sistema de proteção considerando a inserção de geração distribuída”, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 1, n. 1, 2020.
- [17] PINTOS, L. D. M., “Sistema de proteção direcional para microrredes com somente medição de corrente”, *Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina*, 2014.
- [18] PINHEIRO, L. V., “Contribuição de um sistema de armazenamento de energia por meio de baterias para regulação dos níveis de tensão de um sistema de distribuição com alta penetração fotovoltaica”, *Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora*, 2020.
- [19] LIMA, M. L., “Técnica de controle comparativo para ajuste de tensão em um sistema de baixa tensão e com alta penetração fotovoltaica utilizando baterias”, *Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Juiz de Fora*, 2021.
- [20] OCHOA, L. F., DENT, C. J., HARRISON, G. P., “Distribution Network Capacity Assessment: Variable DG and Active Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 1, pp. 87–95, 2010.
- [21] HNYILICZA, E., LEE, S., SCHWEPPE, F., “Steady-state security regions: set-theoretic approach”. In: *Proceedings of the IEEE PICA Conference*, pp. 347–355, 1975.
- [22] KUNDUR, P. S., MALIK, O. P., *Power system stability and control*. McGraw-Hill Education, 2022.
- [23] STOTT, B., “Review of load-flow calculation methods”, *Proceedings of the IEEE*, v. 62, n. 7, pp. 916–929, 1974.
- [24] KAYE, R., WU, F., “Analysis of linearized decoupled power flow approximations for steady-state security assessment”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, v. 31, n. 7, pp. 623–636, 1984.
- [25] BANAKAR, M., GALIANA, F., “Power System Security Corridors Concept and Computation”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-100, n. 11, pp. 4524–4532, 1981.
- [26] DERSIN, P., LEVIS, A. H., “Feasibility sets for steady-state loads in electric power networks”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, , n. 1, pp. 60–70, 1982.
- [27] WU, F., KUMAGAI, S., “Steady-state security regions of power systems”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, v. 29, n. 11, pp. 703–711, 1982.
- [28] LIU, C.-C., WU, F. F., “Steady-state voltage stability regions of power systems”, *Systems & control letters*, v. 6, n. 1, pp. 23–31, 1985.
- [29] LIU, C.-C., “A New Method for the Construction of Maximal Steady-State Security Regions of Power Systems”, *IEEE Power Engineering Review*, v. PER-6, n. 11, pp. 25–26, 1986.

- [30] WU, F., TSAI, Y.-K., YU, Y.-X., “Probabilistic steady-state and dynamic security assessment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 1, pp. 1–9, 1988.
- [31] EMMANUEL, P., KEJARIWAL, M., “Steady state security assessment of power system using neural networks”. In: *Fourth IEEE Region 10 International Conference TENCON*, pp. 742–745, 1989.
- [32] SUN, H., YU, D., XIE, Y., “Flexible steady-state security region of power system with uncertain load demand and soft security limits”. In: *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, v. 4, pp. 2008–2013 vol. 4, 2000.
- [33] JARDIM, J., “Online dynamic security assessment: implementation problems and potential use of artificial intelligence”. In: *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, v. 1, pp. 340–345 vol. 1, 2000.
- [34] YU, Y., “Security region of bulk power system”. In: *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, v. 1, pp. 13–17, 2002.
- [35] JARDIM, J., NETO, C., KWASNICKI, W., “Design features of a dynamic security assessment system”. In: *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, pp. 446–452 vol.1, 2004.
- [36] JARDIM, J., NETO, C., DOS SANTOS, M. G., “Brazilian System Operator Online Security Assessment System”. In: *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 7–12, 2006.
- [37] NETO, C. S., QUADROS, M. A., SANTOS, M. G., JARDIM, J., “Brazilian system operator online security assessment system”. In: *IEEE PES general meeting*, pp. 1–7, 2010.
- [38] YU, Y., LI, H., HAN, Q., LEE, S., ZHANG, P., “Practical Boundary of Static Voltage Stability Region in Cut-set Complex Power Space of Power Systems”. In: *2005 IEEE/PES Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1–6, 2005.
- [39] WANG, L., MORISON, K., “Implementation of online security assessment”, *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 4, n. 5, pp. 46–59, 2006.
- [40] MORISON, K., GLAVIC, M., “Review of on-line dynamic security assessment tools and techniques”. In: *CIGRE, Paris, France*, 2007.
- [41] MORISON, K., WANG, L., KUNDUR, P., “Power system security assessment”, *IEEE power and energy magazine*, v. 2, n. 5, pp. 30–39, 2004.
- [42] MORISON, K., WANG, L., HAMADANI, H., “New tools for blackout prevention”. In: *2006 IEEE PES power systems conference and exposition*, pp. 319–324, 2006.
- [43] MORISON, K., HAMADANIZADEH, H., WANG, L., “Dynamic security assessment tools”. In: *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36364)*, v. 1, pp. 282–286, 1999.
- [44] SARMIENTO, H., PAMPIN, G., BARAJAS, R., CASTELLANOS, R., VILLA, G., MIRABAL, M., “Nomograms for assistance in voltage security visualization”. In: *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 1–6, 2009.

- [45] EL-KADY, M. A., AL-AMMAR, E. A., “Framework for identification of power system operating security regions”. In: *2009 Third International Conference on Network and System Security*, pp. 415–419, 2009.
- [46] ALMEIDA, F., PASSOS FILHO, J., PEREIRA, J., MARCATO, A., DE OLIVEIRA, E., “Assessment of the generator remote voltage control through static security regions”. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–7, 2011.
- [47] MARIA, G., YUEN, A., FINDLAY, J., “Control variable adjustment in load flows”, *IEEE transactions on power systems*, v. 3, n. 3, pp. 858–864, 1988.
- [48] ALMEIDA, F. C., PASSOS FILHO, J. A., PEREIRA, J. L., HENRIQUES, R. M., MARCATO, A. L., “Assessment of load modeling in power system security analysis based on static security regions”, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 24, pp. 148–161, 2013.
- [49] ALVES, F. R. D. M., HENRIQUES, R., PASSOS FILHO, J., GOMES JÚNIOR, S., BORGES, C., RANGEL, R., FALCÃO, D., AVELEDA, A., TARANTO, G., ASSIS, T., “Ferramenta integrada para avaliação da segurança estática e dinâmica de sistemas elétricos de potência de grande porte”, *XII SEPOPE, Maio*, 2012.
- [50] CEPEL, “Centro de Pesquisas de Energia Elétrica”, Disponível em: <https://www.cepel.br/>.
- [51] ALVES, F. R., HENRIQUES, R. M., PASSOS FILHO, J. A., BORGES, C., OTHERS, “Static and dynamic security assessment of large power systems for online and offline applications”, *45th CIGRÉ Session*, 2014.
- [52] HENRIQUES, R., ALVES, F., PASSOS FILHO, J., GOMES JUNIOR, S., RANGEL, R., BORGES, C., FALCAO, D., TARANTO, G., ASSIS, T., “Melhorias da Avaliação de Segurança de Sistemas Elétricos Através da Representação Detalhada de Equipamentos e Monitoração do Amortecimento de Oscilações”, *XXII SNTPEE, Brasília, DF, Brasil*, 2013.
- [53] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “RELATÓRIO DE ANÁLISE DE PERTURBAÇÃO RAP-ONS 00012/2023”, Disponível em: [https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RAP%202023.08.15%2008h30min%20vers%c3%a3o%20final%20com%20anexos%20de%20diverg%c3%aancia\\_Final.pdf](https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RAP%202023.08.15%2008h30min%20vers%c3%a3o%20final%20com%20anexos%20de%20diverg%c3%aancia_Final.pdf).
- [54] ALVES, F., HENRIQUES, R., ALMEIDA, L., Fº, J. P., LA GATTA, P., FERNANDES, R., LÍRIO, F., GOMES JR, S., “Using a Static and Dynamic Security Assessment Tool to Evaluate the Effects of Increasing Wind Power Penetration in Future Operating Conditions of the Brazilian Interconnected Power System”, *2016 CIGRE Session, 2016, Paris. Anais do 2016 CIGRE Session.*, 2016.
- [55] XIAO, J., GU, W., WANG, C., LI, F., “Distribution system security region: definition, model and security assessment”, *IET generation, transmission & distribution*, v. 6, n. 10, pp. 1029–1035, 2012.
- [56] CHEN, S. J., CHEN, Q. X., XIA, Q., KANG, C. Q., “Steady-state security assessment method based on distance to security region boundaries”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 7, n. 3, pp. 288–297, 2013.

- [57] XIAO, J., HE, Q., LI, X., ZU, G., “A secure and efficient management system for smart distribution grid based on Distribution System Security Region (DSSR)”. In: *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, pp. 1664–1667, 2014.
- [58] XIAO, J., ZU, G.-Q., ZHANG, B.-Q., LI, F.-X., “Distribution system security region for real-time monitoring: Model and topological characteristics”. In: *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, 2017.
- [59] YANG, T., YU, Y., “Steady-state security region-based voltage/var optimization considering power injection uncertainties in distribution grids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, n. 3, pp. 2904–2911, 2018.
- [60] YAZDANI, A., IRAVANI, R., *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [61] JUN, X., YUQING, Q., CHENHUI, S., ZHANG, B., BUXIN, S., QISI, L., “Security region and total supply capability under N-0 for urban distribution network”. In: *2020 IEEE power & Energy society general meeting (PESGM)*, pp. 1–5, 2020.
- [62] XIAO, J., ZU, G., ZHOU, H., ZHANG, X., “Total quadrant security region for active distribution network with high penetration of distributed generation”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, v. 9, n. 1, pp. 128–137, 2021.
- [63] AVILA, O. F., PASSOS FILHO, J. A., PERES, W., “Steady-state security assessment in distribution systems with high penetration of distributed energy resources”, *Electric Power Systems Research*, v. 201, pp. 107500, 2021.
- [64] DUGAN, R. C., “Reference guide: The open distribution system simulator (opendss)”, *Electric Power Research Institute, Inc*, v. 7, pp. 29, 2012.
- [65] TINOCO, R. A., PASSOS FILHO, J. A., PERES, W., HENRIQUES, R. M., “A new particle swarm optimization-based methodology for determining online static security regions”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, v. 31, n. 3, pp. e12790, 2021.
- [66] KENNEDY, J., EBERHART, R., “Particle swarm optimization”. In: *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, v. 4, pp. 1942–1948, 1995.
- [67] TAVELA, F. M., AVILA, O. F., PASSOS FILHO, J. A., “Utilização de Regiões de Segurança para Avaliação do Impacto de Geração Eólica em Sistemas Elétricos de Potência”, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 1, n. 1, 2020.
- [68] MONTICELLI, A. J., *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. E. Blucher, 1983.
- [69] CHENGJIN, L., JUN, X., “Distribution System Security Region considering Flexible Resources (CICED2022)”. In: *2022 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, pp. 690–694, 2022.
- [70] LIMA, M. L., POMBO, R. V., PASSOS FILHO, J. A., ÁVILA, O. F., “Impact of ancillary services in the steady-state security region in distribution systems”. In: *2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, pp. 1–7, 2022.

- [71] LIMA, M. L., PINHEIRO, L. V., OLIVEIRA, J. G., ARCHETTI, J. A. G., OLIVEIRA, L. W., “Control methodologies for energy storage systems to support voltage in distribution grids with photovoltaic insertion”. In: *2021 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1–7, 2021.
- [72] ARCHETTI, J. A. G., PINHEIRO, L. V., LIMA, M. L., MUSSE, B. F., DE OLIVEIRA, J. G., DE OLIVEIRA, L. W., “Real Time Simulation in a Distribution System Including PV Inverter and Voltage Regulator: Voltage Impact Analysis”. In: *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6, 2019.
- [73] ARCHETTI, J. A. G., “Estudo e regulação dos níveis de tensão em sistemas de distribuição com alta penetração de renováveis utilizando simulações em tempo real”, *Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora*, 2019.
- [74] MAIHEMUTI, S., WANG, W., WU, J., WANG, H., MUHEDANER, M., “New Energy Power System Static Security and Stability Region Calculation Research Based on IPSO-RLS Hybrid Algorithm”, *Energies*, v. 15, n. 24, pp. 9655, 2022.
- [75] MAIHEMUTI, S., WANG, W., WU, J., WANG, H., MUHEDANER, M., ZHU, Q., “New Energy Power System Dynamic Security and Stability Region Calculation Based on AVURPSO-RLS Hybrid Algorithm”, *Processes*, v. 11, n. 4, pp. 1269, 2023.
- [76] TAVELA, F. M., “Desenvolvimento de técnicas avançadas para construção de regiões de segurança estática”, *Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora*, 2020.
- [77] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Procedimentos de Rede”, Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>.
- [78] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Prodist”, Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>.
- [79] ALMEIDA, F. D. C. B., *Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle e Modelagem de Carga a partir de Regiões de Segurança Estática*, Ph.D. Thesis, Dissertação, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011. 195 f, 2011.
- [80] VIEIRA FILHO, X., *Operação de sistemas de potência com controle automático de geração*. Campus, 1984.
- [81] KENNEDY, J., “The particle swarm: social adaptation of knowledge”. In: *Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'97)*, pp. 303–308, 1997.
- [82] SHI, Y., EBERHART, R., “A modified particle swarm optimizer”. In: *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*, pp. 69–73, 1998.



- [83] SHUHUA, W., XUELIANG, Z., HAINAN, L., SHUYANG, L., JIAYING, W., “A Modified Particle Swarm Optimization Algorithm”. In: *2005 International Conference on Neural Networks and Brain*, v. 1, pp. 318–321, 2005.
- [84] LEE KY, E.-S. M., “Fundamentals of Particle Swarm Optimization Techniques”, In: *Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems*, pp. 71–87, 2008.
- [85] UNGERER, T., ROBIČ, B., ŠILC, J., “A survey of processors with explicit multithreading”, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, v. 35, n. 1, pp. 29–63, 2003.
- [86] DALCIN, L., “MPI for Python”, Disponível em: <https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/>.
- [87] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Prodist - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica”, Disponível em: [https://antigo.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8\\_Revisao\\_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19](https://antigo.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19).
- [88] IEEE-PES, “Power energy society”, Disponível em: <https://ieee-pes.org/>.
- [89] SHORT, T. A., *Electric power distribution handbook*. CRC press, 2014.
- [90] ROCHA, C., RADATZ, P., “Algoritmo de Fluxo de Potência do OpenDSS”, *Electr. Power Syst. Res*, pp. 1–24, 2017.
- [91] STEVENSON, W. D., *Elementos de análise de sistemas de potência*. McGraw-Hill do Brasil, 1974.
- [92] DA COSTA, V., *Circuitos Elétricos Lineares: Enfoques Teórico e Prático*. INTERCINCIA, 2013.
- [93] MEISEL, J., BARNARD, R. D., “Application of fixed-point techniques to load-flow studies”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, , n. 1, pp. 136–140, 1970.
- [94] ZARGAR, B., MONTI, A., PONCI, F., MARTÍ, J. R., “Linear Iterative power flow approach based on the current injection model of load and generator”, *IEEE Access*, v. 9, pp. 11543–11562, 2020.

## APÊNDICE A – Fluxo de potência em sistemas de distribuição

Conforme descrito em [68], o fluxo de potência, ou também denominado fluxo de carga, consiste na determinação do estado operativo de um sistema, o que pode ser entendido como o conhecimento da distribuição dos fluxos na rede, e de algumas grandezas de interesse, a exemplo de tensões e correntes. Nesse estado operativo, a modelagem da rede é feita de forma estática, na qual variações referentes a efeitos transitórios são desprezados. Essa modelagem por sua vez, é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas não-lineares. O sistema de equações faz referência às leis de Kirchhoff para circuitos elétricos, proposta pelo físico alemão Gustav Robert Kirchhoff, em 1847, enquanto que as inequações representam restrições operacionais da rede, a exemplo dos limites de potência reativa dos geradores.

Neste trabalho, utilizou-se o *software* OpenDSS para resolução do fluxo de potência. O OpenDSS é um *software* de simulação de sistemas elétricos de distribuição e que trabalha no domínio da frequência, ou seja, quando as tensões e correntes se encontram em regime permanente senoidal, sendo representadas por fasores. A obtenção desses fasores se dá através da solução de um sistema de equações algébricas, o que pode ser realizado de diferentes métodos, a exemplo do Newton-Raphson ou Gauss-Saidel [23]. No entanto, a estratégia de solução utilizada no OpenDSS difere dos demais métodos, utilizando o método do Ponto Fixo Iterativo, construído sobre a lei de Kirchhoff das correntes, e representado pela Equação (A.1). Nesta equação,  $\dot{\mathbf{I}}$  representa o vetor de injeção de correntes,  $\bar{\mathbf{Y}}$  a matriz de admitâncias nodais e  $\dot{\mathbf{V}}$  o vetor de tensões nodais.

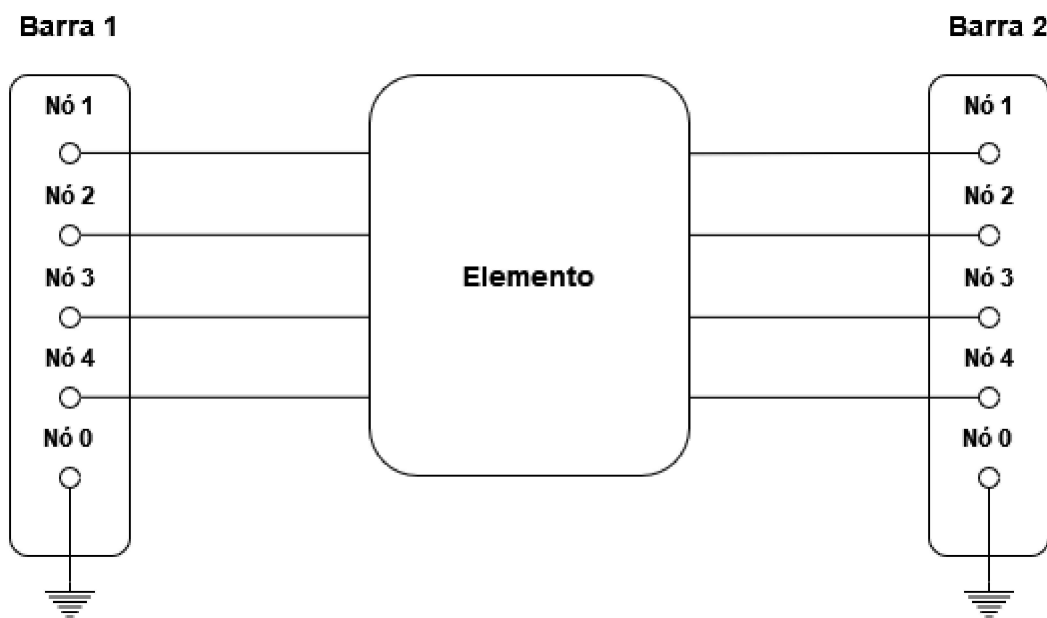
$$\dot{\mathbf{I}} = \bar{\mathbf{Y}} \times \dot{\mathbf{V}} \quad (\text{A.1})$$

Tendo em vista que as tensões e correntes nodais não são conhecidas, o sistema descrito na Equação (A.1) não está definido, logo, não possui uma solução algébrica, sendo necessário um método numérico, que consiste em um processo iterativo, a fim de gerar uma solução aproximada para o problema, de acordo com uma determinada tolerância. Durante esse processo, será necessário, inicialmente, construir a matriz de admitância nodal, descrito na Seção A.1. Em seguida, ajustar as correntes injetadas devido a característica não linear das cargas, etapa descrita na Seção A.2. E então recalculer o novo estado operativo da rede, de modo iterativo, conforme detalhado na Seção A.3. Todo o processo de solução do fluxo de potência que será apresentado é baseado na descrição realizada pelo EPRI em [90].

### A.1 Montagem da matriz de Admitância Nodal

Em um sistema elétrico, é comum a designação de barras elétricas para se referir aos pontos de conexão entre diferentes equipamentos, a exemplo, de linhas ou transformadores. Por sua vez, em uma barra podem haver diferentes terminais de conexão, a exemplo de diferentes fases de uma rede de corrente alternada, e cada um desses pontos é definido com um nó elétrico. Na Figura 57 é possível ver um elemento do sistema conectado entre duas barras (barra 1 e barra 2), sendo que cada uma dessas barras possui diferentes nós para conexão deste elemento (nós de 0 a 4 de cada elemento, sendo uma convenção a adoção do nó 0 como referência de potencial).

Figura 57 – Representação de um elemento conectado no sistema.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Considerando um sistema elétrico formado por  $n$  nós, a matriz de Admitância Nodal, representada por  $\bar{\mathbf{Y}}$ , é uma matriz de dimensão  $n \times n$ , cujos elementos representam as admitâncias equivalentes entre dois nós quaisquer, sejam eles de uma mesma barra ou de barras diferentes, sendo cada nó definido pelo número da linha e da coluna que ocupa nesta matriz. Os elementos que compõem a diagonal principal são denominados admitâncias próprias ou admitância de entrada, enquanto que os elementos fora da diagonal principal são ditos admitâncias de transferência. Por definição, a admitância de entrada localizada na linha  $i$  e coluna  $i$  da matriz  $\bar{\mathbf{Y}}$ , representada por  $\bar{Y}_{ii}$ , pode ser obtida curto-circuitando todos os demais nós diferentes de  $i$ , ao nó de referência, e calculando a razão entre a corrente injetada pelo nó  $i$  e a tensão deste mesmo nó [91].

$$\bar{Y}_{ii} = \left. \frac{\dot{I}_i}{\dot{V}_i} \right|_{\dot{V}_k=0, \forall k \neq i} \quad (\text{A.2})$$

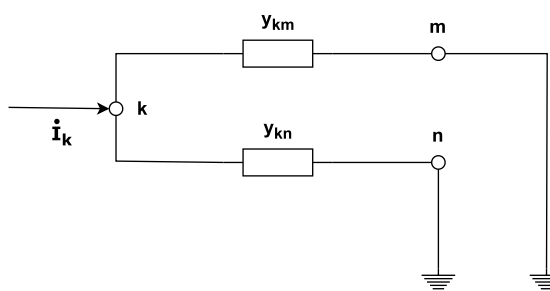
De modo análogo, a admitância de transferência localizado na linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz  $\bar{\mathbf{Y}}$ , representada por  $\bar{Y}_{ij}$ , pode ser obtida curto-circuitando todos os demais nós, diferente de  $i$ , ao nó de referência, e calculando a razão entre a corrente injetada pelo nó  $j$  e a tensão do nó  $i$ .

$$\bar{Y}_{ij} = \left. \frac{\dot{I}_j}{\dot{V}_i} \right|_{\dot{V}_k=0, \forall k \neq i} \quad (\text{A.3})$$

Seguindo esta definição, a matriz de admitância nodal pode ser obtida replicando o processo descrito para todos os nós do sistema, que também pode ser encontrada através da sobreposição da matriz de admitância primitiva de cada elemento, que nada mais é que uma submatriz contendo as admitâncias próprias e de transferência para todos os nós que possuem conexão elétrica com aquele determinado elemento. Ao consolidar essas diferentes submatrizes, respeitando a ordem das linhas e colunas, obtém-se a matriz de admitância nodal no sistema.

No circuito esquemático da Figura 58 é possível ver um exemplo simplificado de como se obter as admitâncias próprias e de transferência conforme Equações (A.2) e (A.3), respectivamente. No exemplo, foi injetada uma corrente na barra  $k$  ( $I_k$ ), enquanto as barras  $m$  e  $n$  foram conectadas ao nó de referência, ou seja, em curto-circuito. Sendo  $V_k$  a tensão na barra, é possível obter a admitância própria para o nó  $k$ ,  $Y_{kk}$ , através das Equações (A.4), (A.5) e (A.6).

Figura 58 – Esquemático para representação dos elementos da matriz de admitância nodal.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

$$Y_{kk} = \frac{\dot{\mathbf{I}}_k}{\dot{\mathbf{V}}_k} \quad (\text{A.4})$$

$$\dot{\mathbf{I}}_k = (\dot{\mathbf{V}}_k - \overset{0}{\dot{\mathbf{V}}_m}) \cdot y_{km} + (\dot{\mathbf{V}}_k - \overset{0}{\dot{\mathbf{V}}_n}) \cdot y_{kn} = \dot{\mathbf{V}}_k \cdot (y_{km} + y_{kn}) \quad (\text{A.5})$$

$$Y_{kk} = \frac{\dot{\mathbf{V}}_k \cdot (y_{km} + y_{kn})}{\dot{\mathbf{V}}_k} = y_{km} + y_{kn} \quad (\text{A.6})$$

De modo análogo, é possível obter a admitância de transferência entre os nós  $k$  e  $m$ , definida por  $Y_{km}$ , conforme demonstrado nas Equações (A.7), (A.8) e (A.9).

$$Y_{km} = \frac{\dot{\mathbf{I}}_m}{\dot{\mathbf{V}}_k} \quad (\text{A.7})$$

$$\dot{\mathbf{I}}_m = (\dot{\mathbf{V}}_m - \dot{\mathbf{V}}_k) \cdot y_{km} = -\dot{\mathbf{V}}_k \cdot y_{km} \quad (\text{A.8})$$

$$Y_{km} = \frac{-\dot{\mathbf{V}}_k \cdot y_{km}}{\dot{\mathbf{V}}_k} = -y_{km} \quad (\text{A.9})$$

A partir das equações acima, é possível perceber que os elementos próprios, que formam a diagonal principal da matriz de admitância nodal, são compostos pelo somatório de todas as admitâncias que possuem conexão elétrica com o nó associado àquela posição na matriz, neste exemplo, a admitância própria  $Y_{kk}$  é composta pelo somatório de todas as admitâncias que se conectam ao nó  $k$ , sejam elas admitâncias série (entre dois nós quaisquer do sistema, com exceção do nó de referência) ou shunt (entre um nó qualquer e o nó de referência). Por outro lado, os elementos fora da diagonal principal, associados às admitâncias de transferência, são formados pelo negativo do somatório das admitâncias séries conectadas àquele nó.

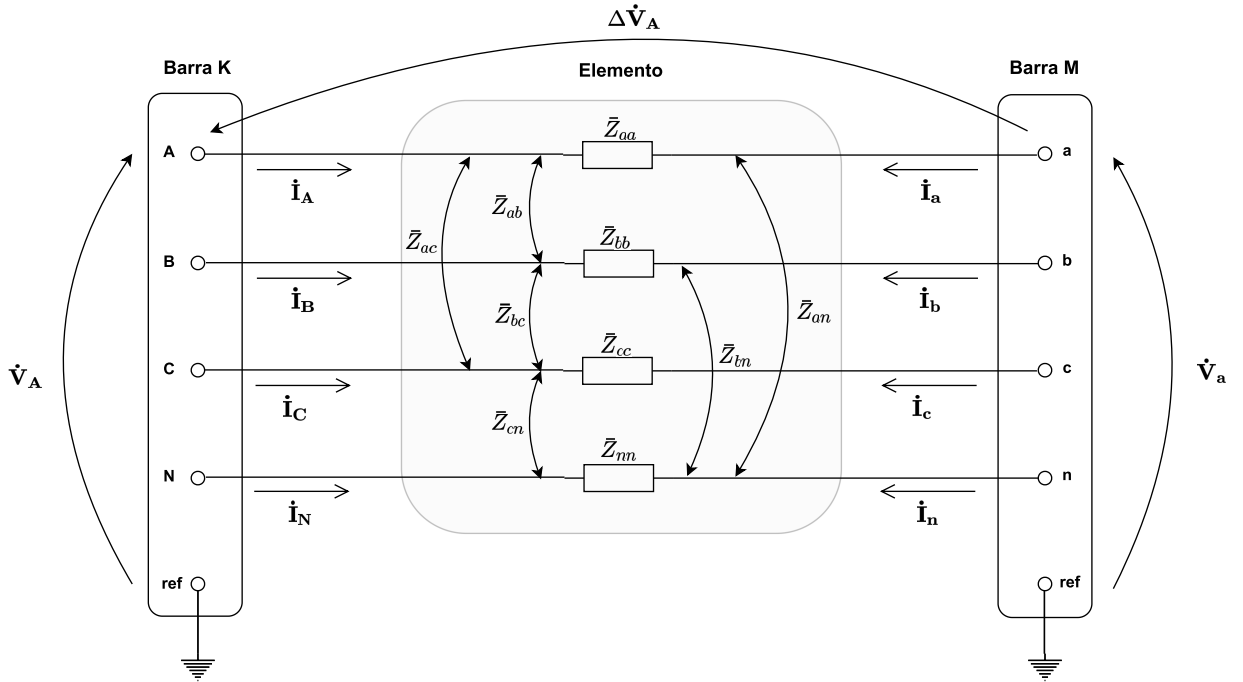
A matriz de admitância nodal será formada pela composição das admitâncias próprias e de transferência para todos os nós do sistema. Vale destacar que como a maior parte dos nós não possuem conexão elétrica entre si, a admitância de transferência entre os mesmos será nula, o que torna essa matriz altamente esparsa, sendo caracterizada como uma matriz diagonal por blocos.

Valendo-se dessa esparsidade outra possibilidade de construção da matriz de admitância nodal é através da inversão da matriz de impedância de cada elemento. Tomando como exemplo a Figura 59 que representa um elemento genérico conectado entre duas barras do sistema. Na sequência é detalhado o processo de obtenção da matriz de admitância primitiva de um elemento genérico, que é parte constituinte para construção da matriz de admitância nodal. Inicialmente, representa-se a variação de tensão entre os terminais do elemento através da relação entre a corrente em cada fase e sua matriz de impedâncias, que contém as impedâncias próprias e mútuas, conforme indicado na Equação (A.10).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{V}}_A \\ \Delta \dot{\mathbf{V}}_B \\ \Delta \dot{\mathbf{V}}_C \\ \Delta \dot{\mathbf{V}}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_A \\ \dot{\mathbf{V}}_B \\ \dot{\mathbf{V}}_C \\ \dot{\mathbf{V}}_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_a \\ \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{V}}_c \\ \dot{\mathbf{V}}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{an} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{bn} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cn} \\ \bar{Z}_{na} & \bar{Z}_{nb} & \bar{Z}_{nc} & \bar{Z}_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_A \\ \dot{\mathbf{I}}_B \\ \dot{\mathbf{I}}_C \\ \dot{\mathbf{I}}_N \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{Z}} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_A \\ \dot{\mathbf{I}}_B \\ \dot{\mathbf{I}}_C \\ \dot{\mathbf{I}}_N \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Multiplicando ambos os lados da equação pelo inverso da matriz de admitância  $\bar{\mathbf{Z}}$ , chega-se na Equação (A.11), que, em sua forma matricial, é representada por (A.12).

Figura 59 – Representação de um elemento genérico entre duas barras.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_A \\ \dot{\mathbf{i}}_B \\ \dot{\mathbf{i}}_C \\ \dot{\mathbf{i}}_N \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{Z}}^{-1} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_A \\ \dot{\mathbf{V}}_B \\ \dot{\mathbf{V}}_C \\ \dot{\mathbf{V}}_N \end{bmatrix} - \bar{\mathbf{Z}}^{-1} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_a \\ \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{V}}_c \\ \dot{\mathbf{V}}_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_A \\ \dot{\mathbf{i}}_B \\ \dot{\mathbf{i}}_C \\ \dot{\mathbf{i}}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} & -\bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_A \\ \dot{\mathbf{V}}_B \\ \dot{\mathbf{V}}_C \\ \dot{\mathbf{V}}_N \\ \dot{\mathbf{V}}_a \\ \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{V}}_c \\ \dot{\mathbf{V}}_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Considerando também que as correntes de uma mesma fase são opostas entre si, como expresso em (A.13) e juntando as Equações (A.12) e (A.13), chega-se em (A.14).

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_a \\ \dot{\mathbf{i}}_b \\ \dot{\mathbf{i}}_c \\ \dot{\mathbf{i}}_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_A \\ \dot{\mathbf{i}}_B \\ \dot{\mathbf{i}}_C \\ \dot{\mathbf{i}}_N \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{A}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{B}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{C}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{N}} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{a}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{b}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{c}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{n}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} & \vdots & -\bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} & \vdots & \bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{A}} \\ \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{B}} \\ \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{C}} \\ \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{N}} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{a}} \\ \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{b}} \\ \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{c}} \\ \dot{\mathbf{V}}_{\mathbf{n}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

Finalmente, é possível definir a matriz de admitância primitiva  $\bar{Y}_{prim}$  deste elemento, representada pela Equação (A.15).

$$\bar{Y}_{prim} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} & \vdots & -\bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} & \vdots & \bar{\mathbf{Z}}_{4 \times 4}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} & \vdots & \bar{Y}_{15} & \bar{Y}_{16} & \bar{Y}_{17} & \bar{Y}_{18} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} & \vdots & \bar{Y}_{25} & \bar{Y}_{26} & \bar{Y}_{27} & \bar{Y}_{28} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} & \vdots & \bar{Y}_{35} & \bar{Y}_{36} & \bar{Y}_{37} & \bar{Y}_{38} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} & \vdots & \bar{Y}_{45} & \bar{Y}_{46} & \bar{Y}_{47} & \bar{Y}_{48} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{Y}_{51} & \bar{Y}_{52} & \bar{Y}_{53} & \bar{Y}_{54} & \vdots & \bar{Y}_{55} & \bar{Y}_{56} & \bar{Y}_{57} & \bar{Y}_{58} \\ \bar{Y}_{61} & \bar{Y}_{62} & \bar{Y}_{63} & \bar{Y}_{64} & \vdots & \bar{Y}_{65} & \bar{Y}_{66} & \bar{Y}_{67} & \bar{Y}_{68} \\ \bar{Y}_{71} & \bar{Y}_{72} & \bar{Y}_{73} & \bar{Y}_{74} & \vdots & \bar{Y}_{75} & \bar{Y}_{76} & \bar{Y}_{77} & \bar{Y}_{78} \\ \bar{Y}_{81} & \bar{Y}_{82} & \bar{Y}_{83} & \bar{Y}_{84} & \vdots & \bar{Y}_{85} & \bar{Y}_{86} & \bar{Y}_{87} & \bar{Y}_{88} \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

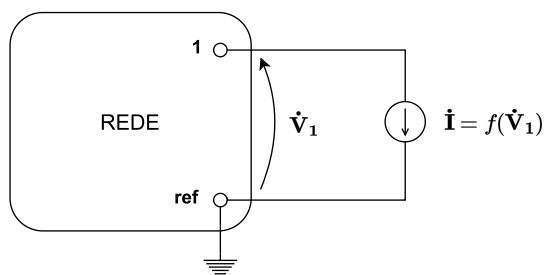
De posse da matriz de admitância primitiva do elemento analisado, é necessário colocá-la na posição correta dentro da matriz de admitância nodal do sistema. Sendo o sistema composto por  $n$  nós, e considerando que elemento em questão está conectado entre os nós  $k$  e  $m$ , os elementos da matriz primitiva serão dispostos conforme Equação (A.16). Replicando o procedimento descrito para todos os elementos da matriz, completa-se o preenchimento da matriz de admitância nodal do sistema.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccccccccccccc}
 1_1 & 1_2 & 1_3 & 1_4 & \dots & k_1 & k_2 & k_3 & k_4 & \dots & m_1 & m_2 & m_3 & m_4 & \dots & n_1 & n_2 & n_3 & n_4
 \end{array} \\
 \left[ \begin{array}{cccccccccccccccc}
 1_1 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 1_2 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 1_3 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 1_4 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 k_1 & & & & & \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} & & \bar{Y}_{15} & \bar{Y}_{16} & \bar{Y}_{17} & \bar{Y}_{18} & & & & & & \\
 k_2 & & & & & \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} & & \bar{Y}_{25} & \bar{Y}_{26} & \bar{Y}_{27} & \bar{Y}_{28} & & & & & & \\
 k_3 & & & & & \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} & & \bar{Y}_{35} & \bar{Y}_{36} & \bar{Y}_{37} & \bar{Y}_{38} & & & & & & \\
 k_4 & & & & & \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} & & \bar{Y}_{45} & \bar{Y}_{46} & \bar{Y}_{47} & \bar{Y}_{48} & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 m_1 & & & & & \bar{Y}_{51} & \bar{Y}_{52} & \bar{Y}_{53} & \bar{Y}_{54} & & \bar{Y}_{55} & \bar{Y}_{56} & \bar{Y}_{57} & \bar{Y}_{58} & & & & & & \\
 m_2 & & & & & \bar{Y}_{61} & \bar{Y}_{62} & \bar{Y}_{63} & \bar{Y}_{64} & & \bar{Y}_{65} & \bar{Y}_{66} & \bar{Y}_{67} & \bar{Y}_{68} & & & & & & \\
 m_3 & & & & & \bar{Y}_{71} & \bar{Y}_{72} & \bar{Y}_{73} & \bar{Y}_{74} & & \bar{Y}_{75} & \bar{Y}_{76} & \bar{Y}_{77} & \bar{Y}_{78} & & & & & & \\
 m_4 & & & & & \bar{Y}_{81} & \bar{Y}_{82} & \bar{Y}_{83} & \bar{Y}_{84} & & \bar{Y}_{85} & \bar{Y}_{86} & \bar{Y}_{87} & \bar{Y}_{88} & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 \vdots & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 n_1 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 n_2 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 n_3 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\
 n_4 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & & 
 \end{array} \right] \quad (A.16)
 \end{array}$$

## A.2 Corrente de compensação

Na modelagem utilizada pelo OpenDSS, os elementos conversores de energia, também denominados *Power Conversion Elements*, que representam equipamentos como geradores ou cargas, podem apresentar um comportamento não linear, sendo função da tensão da barra em que estão conectados, a exemplo da Figura 60 onde é representada uma carga. Por conta disso, tais elementos são modelados através de seus respectivos equivalentes de Norton [92], onde uma fonte de corrente (referente à fonte equivalente de Norton) reproduz o comportamento não linear do elemento conversor, e a admitância de Norton em paralelo, representada por  $\bar{Y}_{lin}$ , reproduz seu comportamento linear. Na Figura 61 tem-se o equivalente de Norton para o circuito da Figura 60.

Figura 60 – Exemplo de uma carga não linear conectada à rede.

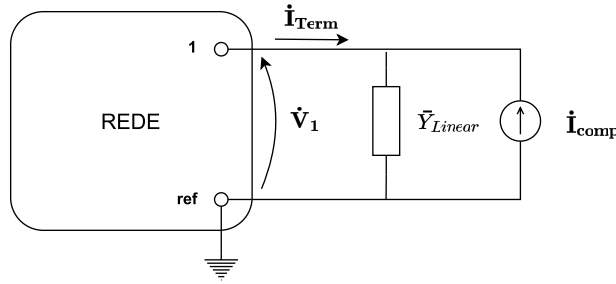


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dada essa representação, a admitância  $\bar{Y}_{Linear}$  deve ser inserida na matriz de admitância nodal do sistema. Além disso, a corrente terminal desse elemento  $\hat{\mathbf{I}}_{Term}$  passa a ser



Figura 61 – Equivalente de Norton para uma carga não linear conectado à rede.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

decompostas em duas parcelas conforme indicado na (A.17), onde  $\dot{\mathbf{I}}_{Comp}$  representa a parcela não linear da carga, e o termo  $\bar{Y}_{Linear} \times \dot{\mathbf{V}}_1$ , a parcela linear da carga.

$$\dot{\mathbf{I}}_{Term} = \bar{Y}_{Linear} \times \dot{\mathbf{V}}_1 - \dot{\mathbf{I}}_{Comp} \quad (A.17)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{Comp} = \bar{Y}_{Linear} \times \dot{\mathbf{V}}_1 - \dot{\mathbf{I}}_{Term} \quad (A.18)$$

Apesar da representação genérica de forma monofásica, a mesma, pode ser estendida para a formulação trifásica, estruturando-se em torno da matriz de admitância primitiva daquele elemento  $\bar{Y}_{prim}$ . Assim, a Equação (A.18) pode ser reescrita por (A.19), ou na forma matricial, por (A.20). Vale destacar que, a forma como a corrente de compensação é estimada ao longo de cada iteração durante a resolução do fluxo de potência será descrito na Seção A.3.

Feita essa consideração acerca da representação dos elementos conversores de energia, e tendo os demais elementos do sistema representados na matriz admitância nodal, é possível avaliar o método de resolução do fluxo de potência.

$$\dot{\mathbf{I}}_{Comp_{abc}} = \bar{Y}_{prim} \times \dot{\mathbf{V}}_{1_{abc}} - \dot{\mathbf{I}}_{Term_{abc}} \quad (A.19)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{Comp_a} \\ \dot{\mathbf{I}}_{Comp_b} \\ \dot{\mathbf{I}}_{Comp_c} \\ \dot{\mathbf{I}}_{Comp_n} \end{bmatrix} = \bar{Y}_{prim} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{1_a} \\ \dot{\mathbf{V}}_{1_b} \\ \dot{\mathbf{V}}_{1_c} \\ \dot{\mathbf{V}}_{1_n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{Term_a} \\ \dot{\mathbf{I}}_{Term_b} \\ \dot{\mathbf{I}}_{Term_c} \\ \dot{\mathbf{I}}_{Term_n} \end{bmatrix} \quad (A.20)$$

### A.3 Método ponto fixo iterativo

A metodologia padrão de resolução de fluxo de potência do OpenDSS é a metodologia do ponto fixo iterativo [93, 94], que a partir de um valor estimado das tensões de todo o sistema, calcula, através da lei de Kirchhoff, via Equação (A.1), as correntes injetadas em cada nó do sistema, bem como as correntes de compensação nestes nós, e partir de

tais valores, atualiza a estimativa inicial assumida, reiniciando o processo iterativo. O grande destaque da metodologia consiste na preservação da matriz de admitância nodal do sistema ao longo das iterações, garantindo elevada eficiência computacional ao método quando comparada a métodos tradicionais que requerem atualização da matriz jacobiana a cada iteração, ao mesmo tempo que garante a capacidade de convergência do fluxo de potência [64].

Conforme descrito em [90], o processo de resolução do fluxo de potência no OpenDSS pode ser descrito em quatro passos, detalhados a seguir e resumidos no fluxograma da Figura 62.

- Passo 1 - Condição Inicial:

Inicialmente considera-se nula a corrente de compensação nas barras, de modo que as tensões nodais são obtidas através do produto da inversa da matriz de admitância nodal,  $\bar{Y}$ , e a corrente injetada nos nós do sistema  $\dot{\mathbf{I}}$ , conforme (A.21).

$$\dot{\mathbf{V}} = \bar{Y}^{-1} \times \dot{\mathbf{I}} \quad (\text{A.21})$$

- Passo 2 - Cálculo da corrente de compensação:

A partir do perfil de tensão do passo anterior, calcula-se para cada elemento de conversão de energia, a sua corrente de compensação, e a partir disso, recalcula-se as correntes nodais do sistema  $\dot{\mathbf{I}}$ .

- Passo 3 - Atualização das tensões nodais:

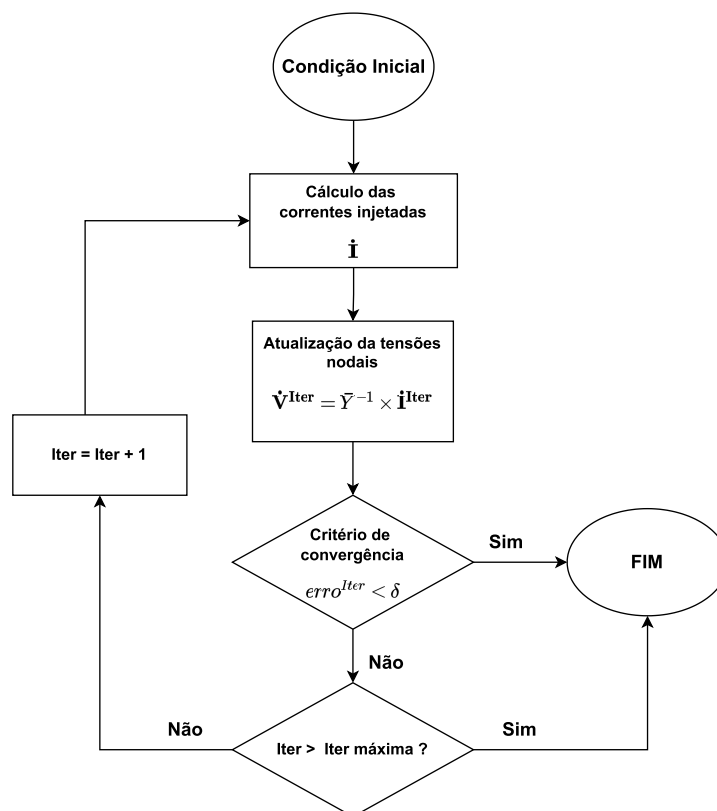
A partir das novas correntes injetadas, atualiza-se o vetor de tensões nodais, conforme equação (A.21).

- Passo 4 - Análise da convergência: Nesta etapa, avalia-se o erro de tensão em relação ao valor de referência. Caso o erro ainda esteja acima da tolerância estipulada (representada por  $\delta$ , com valor padrão de 0,0001 p.u.), retorna-se ao passo 2 de forma cíclica até que a condição de convergência seja atingida ou até que o número máximo de interações seja atingido.

#### A.4 Exemplo numérico

Nesta seção será feito um exemplo considerando o circuito da Figura 63, desde a montagem da matriz de admitância nodal, a partir das matrizes de admitâncias primitivas, até a resolução do fluxo de potência via método do ponto fixo iterativo. Os detalhes da rede simulada poderão ser encontrados no Apêndice B. A rede analisada é desequilibrada a 3 fios com carga equilibrada de 5400 kW e fator de potência 0,9 indutivo, conectado em estrela aterrada. O transformador possui conexão estrela aterrada - estrela aterrada, com

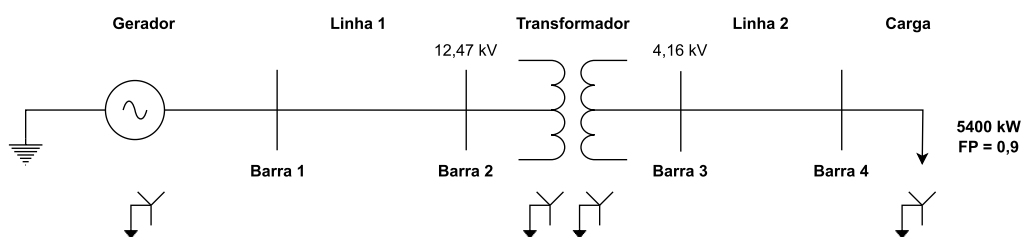
Figura 62 – Fluxograma de etapas do fluxo de potência.



Fonte: Adaptado de [90].

tensão de 12,47 kV no lado de alta, e 4,16 kV no lado de baixa. O gerador conectado no lado de alta do transformador também possui conexão estrela aterrada.

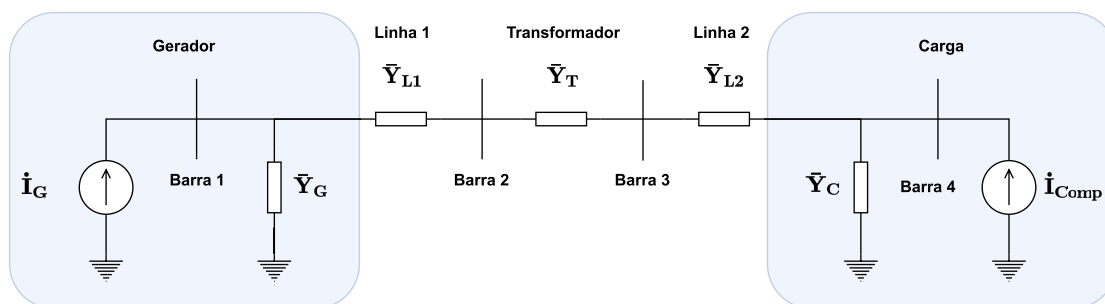
Figura 63 – Circuito Tutorial 4 Barras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme descrito na Seção A.2, os elementos conversores de energia no OpenDSS são representados por seus respectivos equivalentes de Norton, de modo que, a rede em questão pode ser representado no OpenDSS pela Figura 64. Neste caso, o gerador e a carga são representados por uma admitância em paralelo a uma fonte de corrente, sendo  $\mathbf{I}_G$  a corrente de Norton do gerador,  $\bar{\mathbf{Y}}_G$ , a admitância de Norton do gerador,  $\mathbf{I}_{Comp}$  a corrente de compensação da carga, e  $\bar{\mathbf{Y}}_C$  a admitância que representa a parcela linear da carga. Além disso,  $\bar{\mathbf{Y}}_{L1}$ ,  $\bar{\mathbf{Y}}_{L2}$ ,  $\bar{\mathbf{Y}}_T$ , representam as matrizes de admitância primitiva das linha 1 e 2 e do transformador, respectivamente.

Figura 64 – Circuito Tutorial 4 Barras Representado no OpenDSS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Definidos os elementos acima, é possível construir a matriz de admitância nodal  $\bar{Y}_{\text{Bus}}$  seguindo a estratégia descrita na seção A.1. Dessa forma, os blocos da diagonal principal da matriz,  $Y_{kk}$ , são formados por todas as admitâncias conectadas à barra  $k$ . Já os blocos fora da diagonal principal,  $Y_{km}$ , serão formados pelo negativo das admitâncias série, conectadas entre as barras  $k$  e  $m$ .

Sendo o sistema formado por 4 barras, e considerando a representação a 3 fios, tem-se um total de 12 nós e, portanto, a matriz de admitância nodal terá dimensão  $12 \times 12$ . A Equação (A.22) mostra a representação diagonal por blocos da matriz de admitância nodal para o circuito em questão, enquanto a Equação (A.23) detalha cada um desses elementos a partir das matrizes de admitância primitiva dos equipamentos da rede.

Sendo as admitâncias primitivas deste exemplo definidas pelas Equações (A.24), (A.25), (A.26), (A.27), (A.28), é possível obter a matriz de admitância nodal do sistema substituindo tais em (A.23), obtendo assim, a matriz de admitância nodal da rede em (A.29).

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\text{Bus}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} & 1_a & 1_b & 1_c & 2_a & 2_b & 2_c & 3_a & 3_b & 3_c & 4_a & 4_b & 4_c \\ \begin{array}{c} 1_a \\ 1_b \\ 1_c \\ 2_a \\ 2_b \\ 2_c \\ 3_a \\ 3_b \\ 3_c \\ 4_a \\ 4_b \\ 4_c \end{array} & \begin{array}{c} \color{red}{Y_G + Y_{L1}} \\ \color{blue}{-Y_{L1}} \\ \color{red}{Y_{L1} + Y_T} \\ \color{blue}{-Y_T} \\ \color{red}{Y_T + Y_{L2}} \\ \color{blue}{-Y_{L2}} \\ \color{red}{Y_{L2} + Y_C} \end{array} & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & \end{array} \end{array} \quad (\text{A.22})$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\text{Bus}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccc} & 1_a & 1_b & 1_c & 2_a & 2_b & 2_c & 3_a & 3_b & 3_c & 4_a & 4_b & 4_c \\ \begin{array}{c} 1_a \\ 1_b \\ 1_c \\ 2_a \\ 2_b \\ 2_c \\ 3_a \\ 3_b \\ 3_c \\ 4_a \\ 4_b \\ 4_c \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{G11} + \bar{\mathbf{Y}}_{L11} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{G21} + \bar{\mathbf{Y}}_{L121} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{G31} + \bar{\mathbf{Y}}_{L131} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L141} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L151} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L161} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{G12} + \bar{\mathbf{Y}}_{L112} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{G22} + \bar{\mathbf{Y}}_{L122} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{G32} + \bar{\mathbf{Y}}_{L132} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L142} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L152} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L162} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{G13} + \bar{\mathbf{Y}}_{L113} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{G23} + \bar{\mathbf{Y}}_{L123} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{G33} + \bar{\mathbf{Y}}_{L133} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L143} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L153} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L163} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{L114} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L124} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L134} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L144} + \bar{\mathbf{Y}}_{T11} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L154} + \bar{\mathbf{Y}}_{T21} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L164} + \bar{\mathbf{Y}}_{T31} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T41} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T51} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T61} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{L115} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L125} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L135} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L145} + \bar{\mathbf{Y}}_{T12} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L155} + \bar{\mathbf{Y}}_{T22} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L165} + \bar{\mathbf{Y}}_{T32} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T42} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T52} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T62} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{L116} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L126} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L136} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L146} + \bar{\mathbf{Y}}_{T13} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L156} + \bar{\mathbf{Y}}_{T23} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L166} + \bar{\mathbf{Y}}_{T33} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T43} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T53} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T63} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{T14} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T24} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T34} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T44} + \bar{\mathbf{Y}}_{L211} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T54} + \bar{\mathbf{Y}}_{L221} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T64} + \bar{\mathbf{Y}}_{L231} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L241} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L251} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L261} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{T15} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T25} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T35} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T45} + \bar{\mathbf{Y}}_{L212} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T55} + \bar{\mathbf{Y}}_{L222} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T65} + \bar{\mathbf{Y}}_{L232} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L242} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L252} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L262} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{T16} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T26} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T36} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T46} + \bar{\mathbf{Y}}_{L213} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T56} + \bar{\mathbf{Y}}_{L223} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{T66} + \bar{\mathbf{Y}}_{L233} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L243} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L253} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L263} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{L214} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L224} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L234} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L244} + \bar{\mathbf{Y}}_{C11} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L254} + \bar{\mathbf{Y}}_{C21} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L264} + \bar{\mathbf{Y}}_{C31} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{L215} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L225} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L235} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L245} + \bar{\mathbf{Y}}_{C12} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L255} + \bar{\mathbf{Y}}_{C22} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L265} + \bar{\mathbf{Y}}_{C32} \end{array} & \begin{array}{c} \bar{\mathbf{Y}}_{L216} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L226} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L236} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L246} + \bar{\mathbf{Y}}_{C13} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L256} + \bar{\mathbf{Y}}_{C23} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{L266} + \bar{\mathbf{Y}}_{C33} \end{array} \end{array} \end{array} \quad (\text{A.23})$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 343, 27 - 1237, 77j & 31, 33 + 10, 00j & 31, 33 + 10, 00j \\ 31, 33 + 10, 00j & 343, 27 - 1237, 77j & 31, 33 + 10, 00j \\ 31, 33 + 10, 00j & 31, 33 + 10, 00j & 343, 27 - 1237, 77j \end{bmatrix} S \quad (\text{A.24})$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} 0, 31 - 0, 15j & 0, 00 + 0, 00j & 0, 00 + 0, 00j \\ 0, 00 + 0, 00j & 0, 31 - 0, 15j & 0, 00 + 0, 00j \\ 0, 00 + 0, 00j & 0, 00 + 0, 00j & 0, 31 - 0, 15j \end{bmatrix} S \quad (\text{A.25})$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{L1}} = \begin{bmatrix} 1, 28 - 2, 66j & -0, 62 + 0, 91j & -0, 23 + 0, 59j & -1, 28 + 2, 66j & 0, 62 - 0, 91j & 0, 23 - 0, 59j \\ -0, 62 + 0, 91j & 1, 44 - 2, 76j & -0, 38 + 0, 73j & 0, 62 - 0, 91j & -1, 44 + 2, 76j & 0, 38 - 0, 73j \\ -0, 23 + 0, 59j & -0, 38 + 0, 73j & 1, 15 - 2, 57j & 0, 23 - 0, 59j & 0, 38 - 0, 73j & -1, 15 + 2, 57j \\ -1, 28 + 2, 66j & 0, 62 - 0, 91j & 0, 23 - 0, 59j & 1, 28 - 2, 66j & -0, 62 + 0, 91j & -0, 23 + 0, 59j \\ 0, 62 - 0, 91j & -1, 44 + 2, 76j & 0, 38 - 0, 73j & -0, 62 + 0, 91j & 1, 44 - 2, 76j & -0, 38 + 0, 73j \\ 0, 23 - 0, 59j & 0, 38 - 0, 73j & -1, 15 + 2, 57j & -0, 23 + 0, 59j & -0, 38 + 0, 73j & 1, 15 - 2, 57j \end{bmatrix} S \quad (\text{A.26})$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{L2}} = \begin{bmatrix} 1, 03 - 2, 13j & -0, 50 + 0, 73j & -0, 18 + 0, 48j & -1, 03 + 2, 13j & 0, 50 - 0, 73j & 0, 18 - 0, 48j \\ -0, 50 + 0, 73j & 1, 15 - 2, 21j & -0, 31 + 0, 58j & 0, 50 - 0, 73j & -1, 15 + 2, 21j & 0, 31 - 0, 58j \\ -0, 18 + 0, 48j & -0, 31 + 0, 58j & 0, 92 - 2, 06j & 0, 18 - 0, 48j & 0, 31 - 0, 58j & -0, 92 + 2, 06j \\ -1, 03 + 2, 13j & 0, 50 - 0, 73j & 0, 18 - 0, 48j & 1, 03 - 2, 13j & -0, 50 + 0, 73j & -0, 18 + 0, 48j \\ 0, 50 - 0, 73j & -1, 15 + 2, 21j & 0, 31 - 0, 58j & -0, 50 + 0, 73j & 1, 15 - 2, 21j & -0, 31 + 0, 58j \\ 0, 18 - 0, 48j & 0, 31 - 0, 58j & -0, 92 + 2, 06j & -0, 18 + 0, 48j & -0, 31 + 0, 58j & 0, 92 - 2, 06j \end{bmatrix} S \quad (\text{A.27})$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} 0,10 - 0,63j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,10 - 0,63j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,10 - 0,63j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j \\ -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,94 - 5,62j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,94 - 5,62j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,94 - 5,62j \end{bmatrix} \mathcal{S} \quad (\text{A.28})$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{Bus}} = \begin{bmatrix} 344,55 - 1240,43j & 30,70 + 10,91j & 31,10 + 10,59j & -1,28 + 2,66j & 0,62 - 0,91j & 0,23 - 0,59j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 30,70 + 10,91j & 344,71 - 1240,53j & 30,94 + 10,72j & 0,62 - 0,91j & -1,44 + 2,76j & 0,38 - 0,73j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 31,10 + 10,59j & 30,94 + 10,72j & 344,42 - 1240,34j & 0,23 - 0,59j & 0,38 - 0,73j & -1,15 + 2,57j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ -1,28 + 2,66j & 0,62 - 0,91j & 0,23 - 0,59j & 1,39 - 3,29j & -0,62 + 0,91j & -0,23 + 0,59j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 0,62 - 0,91j & -1,44 + 2,76j & 0,38 - 0,73j & -0,62 + 0,91j & 1,54 - 3,39j & -0,38 + 0,73j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 0,23 - 0,59j & 0,38 - 0,73j & -1,15 + 2,57j & -0,23 + 0,59j & -0,38 + 0,73j & 1,26 - 3,20j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 1,96 - 7,75j & -0,50 + 0,73j & -0,18 + 0,48j & -1,03 + 2,13j & 0,50 - 0,73j & 0,18 - 0,48j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & 0,00 + 0,00j & -0,50 + 0,73j & 2,09 - 7,83j & -0,31 + 0,58j & 0,50 - 0,73j & -1,15 + 2,21j & 0,31 - 0,58j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -0,31 + 1,88j & -0,18 + 0,48j & -0,31 + 0,58j & 1,86 - 7,68j & 0,18 - 0,48j & 0,31 - 0,58j & -0,92 + 2,06j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & -1,03 + 2,13j & 0,50 - 0,73j & 0,18 - 0,48j & 1,34 - 2,28j & -0,50 + 0,73j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,50 - 0,73j & -1,15 + 2,21j & 0,31 - 0,58j & -0,50 + 0,73j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,18 - 0,48j & 0,31 - 0,58j & -0,92 + 2,06j & -0,18 + 0,48j & -0,31 + 0,58j & 1,24 - 2,21j \end{bmatrix} \mathcal{S} \quad (\text{A.29})$$

### Passo 1 - Condição Inicial

Com a matriz de admitância nodal definida, inicia-se o passo 1 da estratégia definida no fluxograma da Figura 62, que consiste na condição inicial do sistema. Na rede em questão, os únicos elementos que atuam como elementos conversores de energia são o gerador e a carga. Sendo as tensões sobre o gerador equilibradas, e adotando a fase *A* como referência angular, baseado na matriz admitância primitiva do gerador dada pela Equação (A.24), é possível calcular diretamente a corrente injetada nos nós da barra 1 pelo equivalente de Norton do gerador,  $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}}$ , através da Equação (A.30). Inicialmente, a corrente de compensação da carga é nula, de modo que o vetor de correntes nodais injetadas no sistema,  $\dot{\mathbf{I}}$ , é composto exclusivamente pelo vetor  $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}}$ .

$$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_a} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_b} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_c} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{G}} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_a} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_b} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_c} \end{bmatrix} \quad (\text{A.30})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_a} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_b} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 343,27 - 1237,77j & 31,33 + 10,00j & 31,33 + 10,00j \\ 31,33 + 10,00j & 343,27 - 1237,77j & 31,33 + 10,00j \\ 31,33 + 10,00j & 31,33 + 10,00j & 343,27 - 1237,77j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7,20 \angle 0^\circ \\ 7,20 \angle -120^\circ \\ 7,20 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{A.31})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_a} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_b} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{G}_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9259,83 \angle -75,96^\circ \\ 9259,83 \angle 164,03^\circ \\ 9259,83 \angle 44,03^\circ \end{bmatrix} kA \quad (\text{A.32})$$

De posse de  $\dot{\mathbf{I}}$  e  $\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{Bus}}$ , calcula-se as tensões nodais do sistema,  $\dot{\mathbf{V}}$ , através de (A.21), obtendo-se (A.33). Por se tratar da condição inicial, que é considerada a iteração zero do processo iterativo, insere-se o sobrescrito  $\dot{\mathbf{V}}^{(0)}$  para representar o vetor de tensões nodais na iteração zero. Para uma melhor representação das equações a seguir, e considerando que a matriz de admitância nodal do sistema é fixa e expressa por (A.29), será mantida sua representação através do termo  $\bar{\mathbf{Y}}_{\mathbf{Bus}}$ .

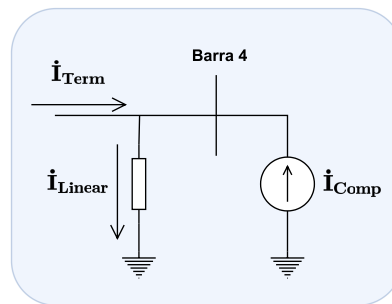


$$\dot{\mathbf{V}}^{(0)} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{1a} \\ \dot{V}_{1b} \\ \dot{V}_{1c} \\ \dot{V}_{2a} \\ \dot{V}_{2b} \\ \dot{V}_{2c} \\ \dot{V}_{3a} \\ \dot{V}_{3b} \\ \dot{V}_{3c} \\ \dot{V}_{4a} \\ \dot{V}_{4b} \\ \dot{V}_{4c} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{Bus}}^{-1} \times \begin{bmatrix} 9259,83 \angle -75,96^\circ \\ 9259,83 \angle 164,03^\circ \\ 9259,83 \angle 44,03^\circ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,20 \angle 0,00^\circ \\ 7,20 \angle -120,00^\circ \\ 7,20 \angle 120,00^\circ \\ 7,14 \angle -0,24^\circ \\ 7,15 \angle -120,27^\circ \\ 7,15 \angle 119,69^\circ \\ 2,30 \angle -2,61^\circ \\ 2,30 \angle -122,69^\circ \\ 2,30 \angle 117,31^\circ \\ 2,08 \angle -5,92^\circ \\ 2,13 \angle -126,32^\circ \\ 2,11 \angle 113,13^\circ \end{bmatrix} \text{ kV} \quad (\text{A.33})$$

### Passo 2 - Cálculo da corrente de compensação (Iteração 1)

A partir do vetor de tensões atualizado, deve-se atualizar a corrente de compensação da carga  $\dot{\mathbf{I}}_{\text{Comp}}$  conforme descrito em (A.18) e representado na Figura 65. Porém, para calcular a corrente de compensação é necessário, primeiramente, calcular a corrente referente a parcela linear da carga,  $\dot{\mathbf{I}}_{\text{Linear}}$ , que é função de sua potência nominal  $P$  e do seu fator de potência  $fp$  conforme (A.34).

Figura 65 – Sentido das Correntes na Barra de Carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Linear}}^{(1)} = \frac{\bar{S}^*}{3 \cdot \dot{\mathbf{V}}_4^{(0)*}} \quad (\text{A.34})$$

$$\bar{S} = \frac{P}{fp} \angle \cos^{-1}(fp) = \frac{5400}{0,9} \angle \cos^{-1}(0,9) = 6000 \angle 25,84^\circ \text{ kVA} \quad (\text{A.35})$$

$$\bar{S}^* = 6000 \angle -25,84^\circ \text{ kVA} \quad (\text{A.36})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Linear}}^{(1)} = \frac{6000 \angle -25,84^\circ}{3 \cdot \dot{\mathbf{V}}_4^{(0)*}} = 2000 \angle -25,84^\circ \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2,08 \angle 5,92^\circ} \\ \frac{1}{2,13 \angle 126,32^\circ} \\ \frac{1}{2,11 \angle -113,13^\circ} \end{bmatrix} \quad (\text{A.37})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Linear}}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,96\angle -31,76^\circ \\ 0,94\angle -152,17^\circ \\ 0,95\angle 87,29^\circ \end{bmatrix} kA \quad (\text{A.38})$$

Com  $\dot{\mathbf{I}}_{\text{Linear}}$  atualiza-se a corrente de compensação da carga conforme (A.39):

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Comp}}^{(1)} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{C}} \times \dot{\mathbf{V}}_4^{(0)} - \dot{\mathbf{i}}_{\text{Linear}}^{(1)} \quad (\text{A.39})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Comp}}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,31 - 0,15j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,31 - 0,15j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,31 - 0,15j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2,08\angle -5,92^\circ \\ 2,13\angle -126,32^\circ \\ 2,11\angle 113,13^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,96\angle -31,76^\circ \\ 0,94\angle -152,17^\circ \\ 0,95\angle 87,29^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{A.40})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Comp}}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0,24\angle 148,24^\circ \\ 0,20\angle 27,83^\circ \\ 0,22\angle -92,71^\circ \end{bmatrix} kA \quad (\text{A.41})$$

### Passo 3 - Atualização das tensões nodais (Iteração 1)

Atualizada a corrente de compensação, atualiza-se o vetor de correntes injetadas  $\dot{\mathbf{I}}$ , em seguida, recalculam-se as tensões nodais (A.42).

$$\dot{\mathbf{V}}^{(1)} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{Bus}}^{-1} \times \dot{\mathbf{I}}^{(1)} \quad (\text{A.42})$$

$$\dot{\mathbf{V}}^{(1)} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{Bus}}^{-1} \times \begin{bmatrix} 9259,83\angle -75,96^\circ \\ 9259,83\angle -164,03^\circ \\ 9259,83\angle -44,03^\circ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,24\angle 148,24^\circ \\ 0,20\angle 27,83^\circ \\ 0,22\angle -92,71^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,20\angle -0,00^\circ \\ 7,20\angle -120,00^\circ \\ 7,20\angle 120,00^\circ \\ 7,12\angle -0,30^\circ \\ 7,14\angle -120,33^\circ \\ 7,13\angle 119,63^\circ \\ 2,27\angle -3,34^\circ \\ 2,28\angle -123,32^\circ \\ 2,27\angle 116,66^\circ \\ 1,98\angle -7,87^\circ \\ 2,07\angle -127,92^\circ \\ 2,03\angle 111,42^\circ \end{bmatrix} kV \quad (\text{A.43})$$

### Passo 4 - Análise da convergência (Iteração 1)

Atualizadas as tensões, e tendo como valores bases de tensão 7,2 kV para as barras 1 e 2, e 2,4 kV para as barras 3 e 4. Calcula-se a variação de tensão para todas as barras, conforme Equação (A.44) e verifica-se se a maior variação é superior a tolerância adotada,

para o exemplo em questão será utilizado uma tolerância de 0,02 a fim de que o sistema obtenha a convergência em poucas iterações.

$$\Delta V = \frac{|\dot{V}^{(1)}| - |\dot{V}^{(0)}|}{V_b} \quad (\text{A.44})$$

$$\Delta V = \begin{bmatrix} \frac{\|7,20\angle 0,00^\circ\| - \|7,20\angle -0,00^\circ\|}{7,2} \\ \frac{\|7,20\angle -120,00^\circ\| - \|7,20\angle -120,00^\circ\|}{7,2} \\ \frac{\|7,20\angle 120,00^\circ\| - \|7,20\angle 120,00^\circ\|}{7,2} \\ \frac{\|7,12\angle -0,30^\circ\| - \|7,14\angle -0,24^\circ\|}{7,2} \\ \frac{\|7,14\angle -120,33^\circ\| - \|7,15\angle -120,27^\circ\|}{7,2} \\ \frac{\|7,13\angle 119,63^\circ\| - \|7,15\angle 119,69^\circ\|}{7,2} \\ \frac{\|2,27\angle -3,34^\circ\| - \|2,30\angle -2,61^\circ\|}{2,4} \\ \frac{\|2,28\angle -123,32^\circ\| - \|2,30\angle -122,69^\circ\|}{2,4} \\ \frac{\|2,27\angle 116,66^\circ\| - \|2,30\angle 117,31^\circ\|}{2,4} \\ \frac{\|1,98\angle -7,87^\circ\| - \|2,08\angle -5,92^\circ\|}{2,4} \\ \frac{\|2,07\angle -127,92^\circ\| - \|2,13\angle -126,32^\circ\|}{2,4} \\ \frac{\|2,03\angle 111,42^\circ\| - \|2,11\angle 113,13^\circ\|}{2,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,000 \\ 0,000 \\ 0,000 \\ 0,003 \\ 0,002 \\ 0,002 \\ 0,013 \\ 0,011 \\ 0,012 \\ 0,041 \\ 0,025 \\ 0,034 \end{bmatrix} \quad (\text{A.45})$$

$$\max(\Delta V) = 0,041 > 0,02 \quad (\text{A.46})$$

## Passo 2 - Cálculo da corrente de compensação (Iteração 2)

Como a máxima variação obtida na primeira iteração é superior a tolerância definida para o sistema, retoma-se o processo iterativo no passo 2, onde é feita recalculada a corrente de compensação.

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Linear}}^{(2)} = 2000\angle -25,84^\circ \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{1,98\angle 7,87^\circ} \\ \frac{1}{2,07\angle 127,92^\circ} \\ \frac{1}{2,03\angle -111,42^\circ} \end{bmatrix} \quad (\text{A.47})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Linear}}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1,01\angle -33,72^\circ \\ 0,97\angle -153,76^\circ \\ 0,99\angle 85,57^\circ \end{bmatrix} kA \quad (\text{A.48})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Comp}}^{(2)} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{C}} \times \dot{\mathbf{V}}_4^{(1)} - \dot{\mathbf{i}}_{\text{Linear}}^{(2)} \quad (\text{A.49})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Comp}}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,31 - 0,15j & 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,31 - 0,15j & 0,00 + 0,00j \\ 0,00 + 0,00j & 0,00 + 0,00j & 0,31 - 0,15j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1,98 \angle -7,87^\circ \\ 2,07 \angle -127,92^\circ \\ 2,03 \angle 111,42^\circ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1,01 \angle -33,72^\circ \\ 0,97 \angle -153,76^\circ \\ 0,99 \angle 85,57^\circ \end{bmatrix} \quad (\text{A.50})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{\text{Comp}}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0,32 \angle 146,28^\circ \\ 0,25 \angle 26,24^\circ \\ 0,28 \angle -94,43^\circ \end{bmatrix} kA \quad (\text{A.51})$$

### Passo 3 - Atualização das tensões nodais (Iteração 2)

Recalculando o vetor de tensões nodais para a segunda iteração.

$$\dot{\mathbf{V}}^{(2)} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{Bus}}^{-1} \times \dot{\mathbf{i}}^{(2)} \quad (\text{A.52})$$

$$\dot{\mathbf{V}}^{(2)} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{Bus}}^{-1} \times \begin{bmatrix} 9259,83 \angle -75,96^\circ \\ 9259,83 \angle 164,04^\circ \\ 9259,83 \angle 44,04^\circ \\ 0,00 \angle 0,00^\circ \\ 0,00 \angle 0,00^\circ \\ 0,00 \angle 0,00^\circ \\ 0,00 \angle 0,00^\circ \\ 0,00 \angle 0,00^\circ \\ 0,00 \angle 0,00^\circ \\ 0,32 \angle 146,28^\circ \\ 0,25 \angle 26,24^\circ \\ 0,28 \angle -94,43^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,20 \angle -0,00^\circ \\ 7,20 \angle -120,00^\circ \\ 7,20 \angle 120,00^\circ \\ 7,11 \angle -0,32^\circ \\ 7,14 \angle -120,34^\circ \\ 7,12 \angle 119,63^\circ \\ 2,26 \angle -3,55^\circ \\ 2,27 \angle -123,45^\circ \\ 2,26 \angle 116,49^\circ \\ 1,94 \angle -8,53^\circ \\ 2,06 \angle -128,27^\circ \\ 2,00 \angle 111,02^\circ \end{bmatrix} kV \quad (\text{A.53})$$

### Passo 4 - Análise da convergência (Iteração 2)

Avaliando a convergência para a segunda iteração.

$$\Delta \mathbf{V} = \frac{|\dot{\mathbf{V}}^{(2)}| - |\dot{\mathbf{V}}^{(1)}|}{V_b} \quad (\text{A.54})$$

$$\Delta \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \frac{\| |7,20 \angle -0,00^\circ| - |7,20 \angle 0,00^\circ| \|}{7,2} \\ \frac{\| |7,20 \angle -120,00^\circ| - |7,20 \angle -120,00^\circ| \|}{7,2} \\ \frac{\| |7,20 \angle 120,00^\circ| - |7,20 \angle 120,00^\circ| \|}{7,2} \\ \frac{\| |7,11 \angle -0,32^\circ| - |7,12 \angle -0,30^\circ| \|}{7,2} \\ \frac{\| |7,14 \angle -120,34^\circ| - |7,14 \angle -120,33^\circ| \|}{7,2} \\ \frac{\| |7,12 \angle 119,63^\circ| - |7,13 \angle 119,63^\circ| \|}{7,2} \\ \frac{\| |2,26 \angle -3,55^\circ| - |2,27 \angle -3,34^\circ| \|}{2,4} \\ \frac{\| |2,27 \angle -123,45^\circ| - |2,28 \angle -123,32^\circ| \|}{2,4} \\ \frac{\| |2,26 \angle 116,49^\circ| - |2,27 \angle 116,66^\circ| \|}{2,4} \\ \frac{\| |1,94 \angle -8,53^\circ| - |1,98 \angle -7,87^\circ| \|}{2,4} \\ \frac{\| |2,06 \angle -128,27^\circ| - |2,07 \angle -127,92^\circ| \|}{2,4} \\ \frac{\| |2,00 \angle 111,02^\circ| - |2,03 \angle 111,42^\circ| \|}{2,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,000 \\ 0,000 \\ 0,000 \\ 0,001 \\ 0,000 \\ 0,001 \\ 0,005 \\ 0,003 \\ 0,004 \\ 0,015 \\ 0,005 \\ 0,012 \end{bmatrix} \quad (\text{A.55})$$

$$\max (\Delta \mathbf{V}) = 0,015 < 0,02 \quad (\text{A.56})$$

Como o desvio de tensão é menor que a tolerância definida, o método atingiu a convergência na segunda iteração, encerrando desta forma o processo iterativo.

## APÊNDICE B – Exemplo Tutorial OpenDSS

```

1 Clear
2 ! IEEE 4-bus test case   Y-Y Stepdown Balanced
3 ! Based on script developed by Alan Dunn and Steve Sparling
4 new circuit.4BusYYbal basekV=12.47 phases=3
5 ! **** HAVE TO STIFFEN THE SOURCE UP A LITTLE; THE TEST CASE ASSUMES AN
   INFINITE BUS
6 ~ mvasc3=200000 200000
7
8 set earthmodel=carson
9 set tolerance=0.01
10 ! **** DEFINE WIRE DATA
11 new wiredata.conductor Runits=mi Rac=0.306 GMRunits=ft GMRac=0.0244
   Radunits=in Diam=0.721
12 new wiredata.neutral   Runits=mi Rac=0.592 GMRunits=ft GMRac=0.00814
   Radunits=in Diam=0.563
13
14 ! **** DEFINE LINE GEOMETRY; REDUCE OUT THE NEUTRAL
15 new linegeometry.4wire nconds=4 nphases=3 reduce=yes
16 ~ cond=1 wire=conductor units=ft x=-4   h=28
17 ~ cond=2 wire=conductor units=ft x=-1.5 h=28
18 ~ cond=3 wire=conductor units=ft x=3    h=28
19 ~ cond=4 wire=neutral   units=ft x=0    h=24
20
21 ! **** 12.47 KV LINE
22 new line.line1 geometry=4wire length=2000 units=ft bus1=sourcebus bus2=n2
23
24 ! **** 3-PHASE STEP-DOWN TRANSFORMER 12.47/4.16 KV Y-Y
25 new transformer.t1 xhl=6
26 ~ wdg=1 bus=n2.1.2.3.0 conn=wye kV=12.47 kVA=6000 %r=0.5
27 ~ wdg=2 bus=n3.1.2.3.0 conn=wye kV=4.16  kVA=6000 %r=0.5
28
29 ! **** 4.16 KV LINE
30 new line.line2 bus1=n3 bus2=n4 geometry=4wire length=2500 units=ft
31
32 ! **** WYE-CONNECTED 4.16 KV LOAD
33 new load.load1 phases=3 bus1=n4 conn=wye kV=4.16 kW=5400 pf=0.9  model=1
34 ! **** HAVE TO ALLOW P, Q TO REMAIN CONSTANT TO ABOUT .79 PU — THIS IS
   ASSUMED IN TEST CASE
35 ! **** DEFAULT IN DSS IS .95, BELOW WHICH IT REVERTS TO LINEAR MODEL
36 ~ vminpu=0.75      ! model will remain const p,q down to 0.75 pu voltage
37
38 set voltagebases=[12.47, 4.16]
39 calcvoltagebases   ! **** let DSS compute voltage bases
40 solve

```

Listing B.1 – Código OpenDSS