



CONSTRUÇÃO DA REGIÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO DIREÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE  
GERAÇÃO RAMIFICADAS

Ricardo Padilha Pareto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Carmen Lucia Tancredo Borges

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

Rio de Janeiro

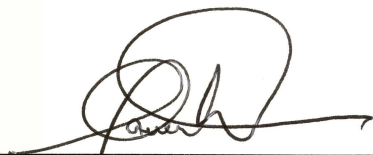
Março de 2016

CONSTRUÇÃO DA REGIÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO DIREÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE  
GERAÇÃO RAMIFICADAS

Ricardo Padilha Pareto

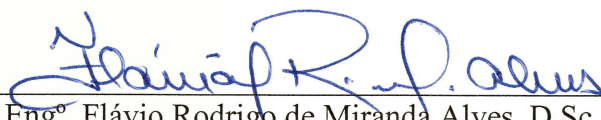
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:



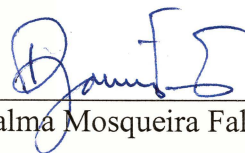
---

Prof. Carmen Lucia Tancredo Borges, D.Sc.



---

Eng. Flávio Rodrigo de Miranda Alves, D.Sc..



---

Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



---

Prof. Ricardo Mota Henriques, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2016

Pareto, Ricardo Padilha

Construção da Região de Segurança Estática de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Direções de Transferência de Geração Ramificadas / Ricardo Padilha Pareto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XV, 103 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carmen Lucia Tancredo Borges

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 94-98.

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Região de Segurança Estática. 3. Metodologia. I. Borges, Carmen Lucia Tancredo, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

## Agradecimentos

À Deus, pelo dom da vida, e por tudo que foi necessário para a realização deste trabalho.

À minha companheira Diva, por todos os momentos de compreensão, companheirismo, dedicação, renúncia, amor e carinho que permitiram minha dedicação a esta dissertação.

Às minhas filhas, Silvana, Clara e Júlia, por todo o sentido que dão à minha vida, e por todo o amor incondicional.

À minha querida netinha e afilhada Manuela, essa nova luz na minha vida e a quem pretendo inspirar.

À minha tia madrinha Rachel, meu porto seguro, e minha maior incentivadora acadêmica.

À minha orientadora, e também amiga, professora Carmen Lucia Tancredo Borges, por acreditar no meu potencial e pelo apoio na transferência para o Programa de Engenharia Elétrica. Por todo o auxílio no desenvolvimento desse trabalho, e também pelos puxões de orelha certamente merecidos. Foi um grande privilégio contar com sua orientação.

Ao meu orientador doutor Flávio Rodrigo de Miranda Alves, um grande incentivador e a quem devo inestimável contribuição a este trabalho expressa na forma de compartilhamento de conhecimento, paciência com minhas dificuldades por minha formação não ser em engenharia e pelo compartilhamento de parte do programa ANAREDE, que possibilitou a implementação desse trabalho.

Aos professores das disciplinas do PEE que cursei, por contribuírem com seu conhecimento à minha capacitação a este trabalho.

Ao professor Djalma Falcão juntamente à minha orientadora, pelo convite para participar da equipe do projeto que me conduziu a esse admirável mundo novo de pesquisa na Engenharia Elétrica.

À equipe do NACAD, professor Álvaro Coutinho, Albino, Mara e Orlando, por me ajudarem com apoio, compreensão e conselhos nos momentos em que precisei.

Aos meus amigos, que torceram pelo meu sucesso e que irão comemorar a realização deste trabalho.

Ao CEPEL pela disponibilização do programa ANAREDE, base fundamental ao desenvolvimento desta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CONSTRUÇÃO DA REGIÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA DE SISTEMAS  
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO DIREÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE  
GERAÇÃO RAMIFICADAS

Ricardo Padilha Pareto

Março/2016

Orientadores: Carmen Lucia Tancredo Borges

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe uma abordagem alternativa para a construção da região de segurança estática de sistemas elétricos de potência a partir de uma modificação no tradicional método baseado em direções de transferência de geração radiais com origem no ponto de operação atual. A modificação consiste na criação de uma malha triangular que cobre de forma homogênea o espaço de possíveis soluções para suprimento da carga. Desta forma, o número de patamares de geração próximos ao ponto de operação inicial é menor e aumenta à medida que se afasta deste ponto, sempre tomando por base a cobertura do espaço de soluções do método tradicional. O resultado é uma malha uniforme, em que qualquer patamar é equidistante dos patamares adjacentes.

A distribuição de patamares obtida torna o tamanho da malha previsível e adaptável à capacidade de processamento disponível. Essa característica apresenta vantagens se considerarmos a utilização do método em um ambiente de tempo real, no qual a janela de tempo para geração dos nomogramas é restrita. Isto significa produzir a melhor região de segurança possível considerando uma janela de tempo e recursos computacionais finitos e bem definidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CONSTRUCTION OF POWER SYSTEMS' STATIC SECURITY REGION USING  
USING BRANCHED ACTIVE POWER TRANSFER DIRECTIONS

Ricardo Padilha Pareto

March/2016

Advisors: Carmen Lucia Tancredo Borges

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

Department: Electrical Engineering

This work proposes an alternative approach to the construction of power systems' static security region based on a modification of the traditional method that considers radial active power generation transfer directions starting from the current operating point. The modification consists in creating a triangular mesh that homogeneously cover the space of possible active power dispatches, considering a constant load. Thus, the number of active power generation levels near the current operating point is small and increases as moving away from this point, always taking into account the coverage of the solution space provided by the traditional method. The result is a uniform grid, in which every active power generation level is equidistant from the adjacent levels.

The distribution of active power generation levels obtained makes the size of the mesh predictable and adaptable to the computing power available. This is an advantage considering the use of the method in a real time environment in which the time window for the generating of nomograms is restricted. The use of the proposed method produces the best possible static security region considering finite and well-defined time window and computational resources.

## Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM SISTEMAS DE ELÉTRICOS DE POTÊNCIA .....	2
1.3 MOTIVAÇÃO.....	4
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	8
CAPÍTULO 2 REGIÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA .....	10
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	10
2.2 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS.....	11
2.3 PROCESSO CONSTRUTIVO.....	13
2.3.1 Etapa I: Definição das Regiões Exportadora e Importadora e dos Grupos de Geração G1 (Folga), G2 e G3.....	14
2.3.2 Etapa II: Determinação dos Fatores de Participação.....	17
2.3.3 Etapa III: Transferência de Geração entre as Regiões Importadora e Exportadora e Avaliação dos Pontos de Operação Gerados .....	18
2.3.4 Etapa IV: Construção Gráfica da RSE a Partir dos Resultados.....	20
2.4 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE DIREÇÕES .....	22
2.5 PASSO DE TRANSFERÊNCIA DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA.....	24
CAPÍTULO 3 - CONSTRUÇÃO DA RSE POR DIREÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE GERAÇÃO RAMIFICADAS .....	28
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	28
3.2 – METODOLOGIA PROPOSTA .....	29
3.3 – IMPLEMENTAÇÃO.....	31
3.4 - SUBSTITUIÇÃO DAS DIREÇÕES RADIAIS POR SETORES COM DIREÇÕES RAMIFICADAS .....	33
3.4.1 - Etapa 1 – Avaliação do Caso Base.....	34



3.4.2 - Etapa 2 – Direção Paralela à Direção Base do Setor.....	35
3.4.3 - Etapa 3 – Direção Defasada de 60 graus da Direção Base do Setor .....	38
3.4.3 – Setor Completo .....	40
3.5 – CÁLCULO DO INCREMENTO DE GERAÇÃO.....	41
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS .....	44
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	44
4.2 ASPECTOS COMPARATIVOS.....	44
4.2.1 Precisão: Equivalência das Curvas Limite .....	45
4.2.2 Cobertura: Área Dentro dos Limites de Geração Coberta pela Metodologia	45
4.2.3 Quantidade de Patamares Gerados .....	45
4.2.4 Tempo de Execução .....	46
4.3 METODOLOGIA DE TESTES .....	46
4.4 SISTEMA 9 BARRAS .....	48
4.4.1 RSE do Sistema 9 barras – Equivalência Percentual.....	49
4.4.2 RSE do Sistema 9 barras – Equivalência Numérica.....	51
4.4.3 RSE do Sistema 9 barras – Avaliação da Cobertura .....	54
4.4.4 Nomograma da RSE do Sistema 9 Barras .....	55
4.5 SISTEMA BRASILEIRO – ONS – DEZEMBRO/2011 .....	57
4.5.1 RSE do SIN – Equivalência Percentual.....	58
4.5.2 RSE do SIN – Equivalência Numérica.....	60
4.5.3 RSE do SIN – Avaliação da Cobertura .....	62
4.6 SISTEMA BRASILEIRO – ONS – 2014 – COMPARAÇÃO POR REGIME DE CARGA .....	63
4.6.1 RSE com Carga Leve – Equivalência Percentual.....	64
4.6.2 RSE com Carga Leve – Equivalência Numérica.....	66
4.6.3 RSE do SIN – Avaliação da Cobertura .....	68
4.6.4 RSE com Carga Média – Equivalência Percentual .....	69

4.6.5 RSE com Carga Média – Equivalência Numérica .....	72
4.6.6 RSE do SIN – Carga Média - Avaliação da Cobertura .....	73
4.6.7 RSE com Carga Pesada .....	75
4.6.8 RSE com Carga Pesada – Equivalência Numérica.....	77
4.6.9 RSE do SIN – Carga Pesada - Avaliação da Cobertura .....	79
4.6.10 Comparativo por Regime de Carga .....	81
4.7 INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO INICIAL	83
4.8 ESTUDO DO ESPAÇO DE BUSCA DE SOLUÇÕES VIÁVEIS.....	85
4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	89
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	91
5.1 CONCLUSÕES .....	91
5.2 TRABALHOS FUTUROS .....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
APÊNDICE A RESULTADOS DAS EXECUÇÕES DOS TESTES.....	99
A.1 SISTEMA 9 BARRAS .....	99
A.2 SISTEMA BRASILEIRO – ONS – DEZEMBRO/2011.....	100
A.3 SISTEMA BRASILEIRO – CARGA LEVE .....	101
A.4 SISTEMA BRASILEIRO – CARGA MÉDIA.....	102
A.5 SISTEMA BRASILEIRO – CARGA PESADA .....	103

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nomograma da Região Segurança Estática .....	4
Figura 2 – Processo de Construção da RSE .....	5
Figura 3 – RSE .....	11
Figura 4 – Fronteiras da Região Segura .....	12
Figura 5 – RSE: Projeções nos Planos G1xG2, G1xG3 e G2xG3 .....	13
Figura 6 – Definição dos Três Grupos de Geração de um SEP.....	14
Figura 7 – Processo de Transferência de Geração.....	15
Figura 8 – Fluxograma Simplificado da Metodologia para Determinação dos Limites de Transferência .....	16
Figura 9 – Exemplo de Definição das Regiões Exportadora (REXP) e Importadora (RIMP).....	17
Figura 10 – Nomograma do Plano G2xG3.....	18
Figura 11 – Construção Gráfica da RSE .....	21
Figura 12 – Processo de Construção da RSE .....	24
Figura 13 – Zona de Incerteza .....	28
Figura 14 – Primeiro Nível da Malha de Patamares de Geração.....	29
Figura 15 – Segundo Nível da Malha de Patamares de Geração.....	30
Figura 16 – Malha de Patamares Percorrida por Nível Separadamente .....	32
Figura 17 – Malha de Patamares Percorrida por 1 Ramificação .....	33
Figura 18 – Fluxograma do Gerenciamento das Etapas .....	34
Figura 19 – Gráfico da etapa 2 .....	36
Figura 20 – Fluxograma da Etapa – Direção Paralela à Direção Base.....	37
Figura 21 – Gráfico da etapa 3 .....	38
Figura 22 – Fluxograma da Etapa 3.....	39
Figura 23 – Gráfico ao Final do Primeiro Setor .....	40
Figura 24 – Malha Homogênea de Patamares de Geração .....	40
Figura 25 – Diagonais dos Espaços de Busca de Soluções Viáveis.....	43
Figura 26 – Espaço de Busca - Carga Leve.....	43
Figura 27 – Espaço de Busca - Carga Média.....	43
Figura 28 – Espaço de Busca - Carga Pesada.....	43
Figura 29 – Topologia do Sistema de 9 Barras .....	48

Figura 30 – Sistema 9 Barras – Grade 20 Direções - Equivalência Percentual.....	50
Figura 31 – Sistema 9 Barras – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual.....	50
Figura 32 – Grade Gerada pela Metodologia Proposta .....	51
Figura 33 – Sistema 9 Barras – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica.....	53
Figura 34 – Sistema 9 Barras – Grade 40 Direções - Equivalência Numérica.....	53
Figura 35 – Sobreposição das Grades – 20 Direções .....	54
Figura 36 – Sobreposição das Grades – 40 Direções .....	55
Figura 37 – Nomograma Gerado pelo ANAREDE Original – 20 direções .....	55
Figura 38 – Nomograma Gerado pelo ANAREDE Original – 40 direções .....	56
Figura 39 – Nomograma Gerado pela Metodologia Proposta.....	56
Figura 40 – SIN – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual .....	59
Figura 41 – SIN – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual .....	59
Figura 42 – SIN – Grade Gerada pela Metodologia Proposta.....	60
Figura 43 – SIN – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica.....	61
Figura 44 – SIN – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica.....	61
Figura 45 – Sobreposição das Grades – 20 Direções .....	62
Figura 46 – Sobreposição das Grades – 40 Direções .....	63
Figura 47 – Carga Leve – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual .....	65
Figura 48 – Carga Leve – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual .....	65
Figura 49 – Carga Leve – Grade Gerada pela Metodologia Proposta.....	66
Figura 50 – Carga Leve – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica.....	67
Figura 51 – Carga Leve – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica.....	68
Figura 52 – Carga Leve – Sobreposição das Grades – 20 Direções.....	69
Figura 53 – Carga Leve – Sobreposição das Grades – 40 Direções.....	69
Figura 54 – Carga Média – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual .....	70
Figura 55 – Carga Média – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual .....	71
Figura 56 – Carga Média – Grade Gerada pela Metodologia Proposta.....	71
Figura 57 – Carga Média – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica .....	73
Figura 58 – Carga Média – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica .....	73
Figura 59 – Carga Média - Sobreposição das Grades – 20 Direções .....	74
Figura 60 – Carga Média - Sobreposição das Grades – 40 Direções .....	74
Figura 61 – Carga Pesada – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual .....	76
Figura 62 – Carga Pesada – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual .....	76
Figura 63 – Carga Pesada – Grade Gerada pela Metodologia Proposta.....	77

Figura 64 – Carga Pesada – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica .....	78
Figura 65 – Carga Pesada – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica .....	79
Figura 66 – Carga Pesada - Sobreposição das Grades – 20 Direções .....	80
Figura 67 – Carga Pesada - Sobreposição das Grades – 40 Direções .....	80
Figura 68 – Quantidade de Patamares por Regime de Carga .....	81
Figura 69 – Grade Comparativa por Regime de Carga - ANAREDE.....	82
Figura 70 – Grade Comparativa por Regime de Carga - Metodologia .....	82
Figura 71 – Nomograma Comparativo por Regime de Carga - ANAREDE .....	83
Figura 72 – Ponto de Operação Inicial Centralizado.....	84
Figura 73 – Ponto de Operação Inicial em Carga Pesada.....	85
Figura 74 – Representação do Nomograma de (SARMIENTO, et al. 2009).....	86
Figura 75 – Retas Limitantes em Carga Leve .....	88
Figura 76 – Retas Limitantes em Carga Pesada .....	88
Figura 77 – Sobreposição do Nomograma com os Patamares Gerados .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição das Regiões Exportadora e Importadora: Cenários Possíveis.....	19
Tabela 2 – Limites Globais de Geração.....	25
Tabela 3 – Limites de Geração por Espaço de Busca (MW) .....	26
Tabela 4 – Comparativo dos Incrementos de Geração .....	26
Tabela 5 – Evolução da Quantidade de Patamares de Geração por Nível da Malha .....	31
Tabela 6 – Valores Mínimos e Máximos de Geração por Grupo em Relação ao Despacho para Determinação dos Espaços de Busca.....	42
Tabela 7 – Geradores do Sistema 9 Barras.....	49
Tabela 8 – Resultados do Sistema 9 Barras – Equivalência Percentual.....	49
Tabela 9 – Resultados do Sistema 9 Barras – Equivalência Numérica.....	52
Tabela 10 – Contingências Programadas.....	57
Tabela 11 – Grupos de Geração – G1, G2 e G3 .....	58
Tabela 12 – Resultados do SIN – Equivalência Percentual.....	58
Tabela 13 – Resultados do SIN – Equivalência Numérica.....	60
Tabela 14 – Resultados Carga Leve Equivalência Percentual .....	64
Tabela 15 – Resultados Carga Leve Equivalência Numérica.....	67
Tabela 16 – Resultados Carga Média Equivalência Percentual .....	70
Tabela 17 – Resultados Carga Média Equivalência Numérica .....	72
Tabela 18 – Resultados Carga Média Equivalência Percentual .....	75
Tabela 19 – Resultados Carga Pesada Equivalência Numérica .....	77
Tabela 20 – Limites do Espaço de Busca em Carga Leve.....	87
Tabela 21 – Limites do Espaço de Busca em Carga Pesada .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP Sistema Elétrico de Potência  
RS Região de Segurança  
RSE Região de Segurança Estática  
VSA Voltage Security Assessment  
VSM Voltage Stability Margin  
VSB Voltage Stability Boundary  
DSA Dynamic Security Assessment  
REXP Região Exportadora  
RIMP Região Importadora  
SIN Sistema Interligado Nacional

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Avaliação da Segurança em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) tem sido objeto de pesquisas há algumas décadas. A desverticalização de empresas de energia elétrica e a desregulamentação do setor em diversos países, aliadas ao aumento da capacidade de processamento disponível tanto na sala de controle quanto em ambientes de estudo *off-line*, tem realimentado este interesse e motivado novas abordagens para o problema.

A exemplo do que ocorreu em outros países, o Sistema Interligado Nacional (SIN) passou pela mudança do modelo vertical, no qual ativos de geração, transmissão e distribuição muitas vezes ficavam sob o controle de uma única empresa, para o modelo horizontal, no qual estas áreas são gerenciadas de forma independente, sob o controle de diferentes agentes. Este novo cenário aumentou a complexidade do planejamento e da operação de SEPs.

Outro fator que contribui para o aumento da complexidade da operação e do planejamento de SEPs é a mudança da matriz energética, que vem ocorrendo de maneira distinta em diversos países. No caso específico do SIN, as principais modificações dizem respeito à inserção de usinas hidrelétricas a fio d'água de grande porte e baixo fator de capacidade e à crescente penetração de fontes de energia renovável sazonais e intermitentes (eólica, solar, biomassa, bagaço de cana, etc.). Apesar de importantes para o aumento da oferta de energia, essas novas fontes aumentam significativamente a complexidade do planejamento e, principalmente, da operação. O aumento das interligações permite a troca de energia entre regiões, aproveitando a natural complementaridade hidrológica entre as diferentes bacias hidrográficas e, adicionalmente, compensa os efeitos de sazonalidade e intermitência de fontes de energia renovável.

Restrições econômicas e ambientais também interferem no crescimento da oferta de energia, tanto pela dificuldade da obtenção de recursos para expansão do sistema de transmissão, quanto por eventuais demoras na obtenção de licenças ambientais. Estes



fatores podem levar a uma situação em que, além da reduzida margem entre a oferta e a demanda de energia, pode haver restrições em relação à transmissão. Todos estes fatores podem levar a uma operação próxima dos limites de estabilidade, diminuindo consideravelmente a tolerância do SEP a perturbações.

Diante do exposto, há a necessidade constante do aprimoramento das ferramentas computacionais utilizadas no planejamento e operação de SEPs. Entre estas ferramentas, destacam-se aquelas capazes de antecipar situações operativas inseguras.

## 1.2 AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM SISTEMAS DE ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Um SEP é considerado seguro, em um dado ponto de operação, se, na ocorrência de um determinado evento ou conjunto de eventos, o sistema se mantém operando sem prejuízos para os consumidores e sem danos aos equipamentos (MORISON, WANG e KUNDUR 2004).

Para garantir a segurança operativa é necessário que alguns critérios sejam atendidos. Estes critérios especificam os limites de excursão de algumas grandezas (tensão nos barramentos, fluxo em linhas de transmissão e transformadores, etc.) durante (limites dinâmicos) e após (limites estáticos) a ocorrência de contingências. Contingências prováveis são definidas como a falha de um componente individual do sistema ou de dois ou mais elementos relacionados, tais como duas linhas de transmissão localizados no mesmo conjunto de torres. A segurança é verificada utilizando ferramentas de análise de contingência que simulam o efeito de cada uma das contingências disponíveis em programas de análise de sistemas de potência. (JAYAWEERA 2003)

A verificação de segurança pode ser subdividida em duas categorias de acordo com a modelagem e os critérios utilizados para a análise, que são: análise de segurança estática e dinâmica. Nos dois casos, o ponto de partida para os estudos é uma “fotografia” do sistema (WOOD e Wollenberg 1996), representada por um ponto de operação que atende às equações de balanço de potência ativa e reativa e às inequações do problema de fluxo de potência (MONTICELLI e GARCIA 2000).

A avaliação da segurança estática é feita por meio do cálculo do fluxo de potência. Diversos critérios podem ser adotados para determinação do estado seguro/inseguro do sistema como os limites para os módulos das tensões nas barras, limites térmicos dos circuitos e limite de geração de potência reativa. Desta forma, podemos considerar um SEP seguro, em relação à segurança estática, se, em um determinado ponto de operação, o sistema permanece com o perfil de tensão, carregamento dos circuitos e geração de potência ativa e reativa das máquinas dentro dos limites considerados seguros. Adicionalmente os mesmos critérios devem ser observados quando da ocorrência de contingências na rede.

A avaliação da segurança dinâmica pode ser feita através da verificação dos diversos aspectos da estabilidade como, por exemplo, a estabilidade transitória, a estabilidade de tensão e a estabilidade a pequenos sinais, além da verificação de critérios específicos (KUNDUR, et al. 2004) para cada contingência simulada. No caso do SIN, esses critérios estão definidos no Módulo 23 dos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (ONS 2011).

Devido à extrema importância da energia elétrica para a atividade econômica e para a vida cotidiana, os operadores dos SEPs, como o ONS, devem acompanhar atentamente o nível de segurança do sistema. Esse acompanhamento pode ser realizado de diversas formas, mas são melhor visualizados através de gráficos com as Regiões de Segurança, que são chamados de nomogramas. Atualmente os nomogramas são a maneira mais comum de visualizar a distância entre o ponto de operação atual e os limites de segurança. A Figura 1 ilustra o conceito de um nomograma.

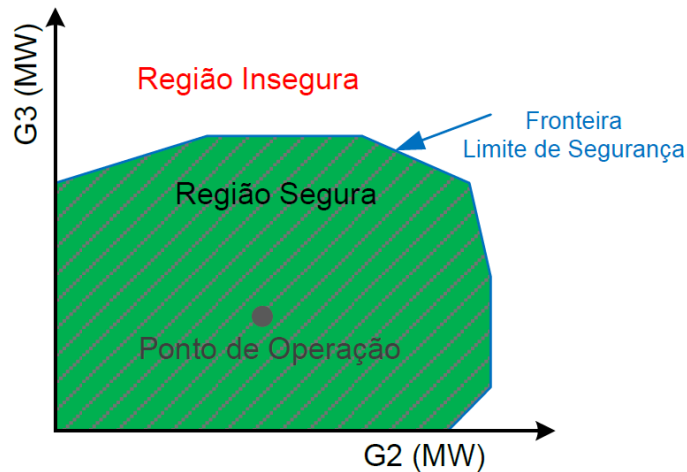


Figura 1 – Nomograma da Região Segurança Estática

Como a proposta desse trabalho diz respeito somente ao processo construtivo das regiões de segurança, apenas a análise de segurança estática será objeto de estudo. Assim passaremos a nomear essas regiões como Região de Segurança Estática (RSE).

### 1.3 MOTIVAÇÃO

Nomogramas com as RSEs vêm sendo amplamente utilizados como forma de visualização da distância entre o ponto de operação do SEP e seus limites de segurança. Entretanto a literatura existente sobre o tema é escassa em detalhamento de algoritmos para construção dos nomogramas. Na maioria das vezes apenas os nomogramas são exibidos sem detalhes do processo de construção. No Brasil temos dois sistemas computacionais que se propõem a criar essas RSEs, que são o ANAREDE (CEPEL 2013) e o ORGANON (JARDIM 2006).

De maneira geral, o nomograma de uma Região de Segurança é construído tomando por base um ponto de operação inicial a partir do qual os valores de potência ativa de três grupos de geradores são redespachados de maneira que a soma da potência ativa gerada por todos os grupos permaneça constante, a menos das perdas, visto que a carga do sistema permanece constante. Esses redespachos são realizados através de incrementos/decrementos de geração que são calculados a partir de um passo de transferência especificado pelo usuário, de forma que uma direção seja percorrida no plano formado por dois grupos de geração. Para cada nova configuração de geração (patamar), a segurança do SEP é reavaliada. Este procedimento é repetido para cada novo

ponto de operação gerado, até que o limite de geração de potência ativa dos grupos seja atingido ou até a não convergência do caso de fluxo de potência para o ponto em questão. Nesta última situação, o percentual de incremento/decremento na potência dos grupos é reduzido a partir de um parâmetro de divisão e a convergência é novamente testada até que se obtenha convergência do fluxo de potência ou até que o limite mínimo para o valor de incremento/decremento seja atingido. Esse processo é repetido para a quantidade de direções configurada. A Figura 2 exemplifica esse processo de construção.

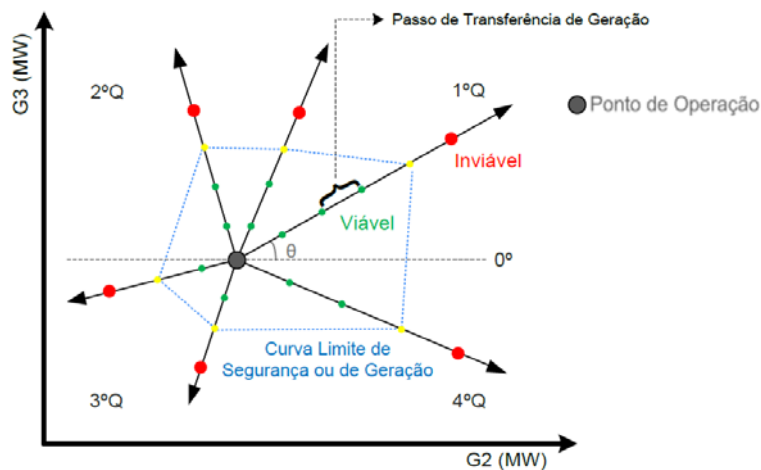


Figura 2 – Processo de Construção da RSE

Este processo exige grandes recursos computacionais e é útil em ambiente de planejamento onde o requisito de tempo para geração de um resultado não é um fator limitante. A eficiência e a velocidade desse método são diretamente dependentes do número de direções, do passo de transferência de geração de potência ativa e do número de contingências simuladas para cada novo ponto de operação gerado. Em relação ao número de direções, em (ALMEIDA 2011) é feito um estudo da influência do número de direções na precisão do nomograma e no tempo de processamento. Segundo o estudo, até 50 direções os nomogramas carecem de precisão, e a partir de 100 direções o aumento da precisão é irrisório. Também foi feito um estudo do impacto no tempo de processamento em função do número de direções e, nesse caso, o tempo aumenta consideravelmente à medida que o número de direções aumenta.

Em relação ao passo de transferência, o estudo apenas avalia seu impacto na precisão do nomograma ao estabelecer a fronteira a partir da qual o sistema apresenta instabilidades, mas não é analisado o seu impacto no desempenho computacional. Mesmo sendo um valor fixo, o impacto do incremento de geração no desempenho computacional

depende da carga do sistema, como veremos ao longo do trabalho. Em um sistema em regime de carga pesada, os limites de geração dos grupos ficam próximos ao ponto de operação atual e um pequeno número de simulações é realizado até que se encontre os limites de segurança. Para um mesmo sistema em regime de carga leve, um número muito maior de simulações será realizado até que se atinja os mesmos limites.

Para um ambiente de operação em tempo real, onde existe um compromisso rigoroso com o tempo de geração da RSE, a utilização de um método de construção de nomogramas baseado em um número de direções e incremento de geração fixos pode não ser adequada, pois não há como prever em quanto tempo o nomograma será criado, considerando os diversos cenários de carga e geração possíveis ao longo do dia.

Além da incerteza em relação ao tempo necessário para a geração da RSE, também devem ser considerada a varredura irregular da região de segurança. O método tradicional gera uma distribuição irregular dos patamares de geração, com uma grande concentração de patamares próximo ao ponto de operação, e uma distribuição bastante esparsa em regiões distantes do ponto de operação, à medida em que a distância entre dois pontos de mesma cardinalidade sobre direções de transferência de geração adjacentes aumenta.

Este trabalho propõe uma variação do método tradicional, de forma a prepará-lo para um ambiente de tempo real, onde existe um claro compromisso com tempo de resposta. Isso é possível a partir da criação de patamares distribuídos de forma homogênea sobre o espaço de soluções, com um incremento de geração adaptável baseado na dimensão deste espaço.

#### 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura técnica apresenta inúmeras referências sobre Avaliação de Segurança Estática e Dinâmica (Voltage Security Assessment – VSA, Dynamic Security Assessment – DSA) e suas diversas aplicações. De maneira geral, os autores abordam métodos para a verificação de segurança, mas nem sempre indicam uma forma de visualização dos índices de segurança obtidos. É comum encontrar referência aos limites de segurança com nomenclaturas diferentes tais como: Voltage Stability Margin (VSM), Voltage Stability

Boundary (VSB) e Região de Segurança (RS). Também existem diversas abordagens para a determinação destes limites, tais como fluxo de potência continuado, redes neurais, algoritmos genéticos, e lógica fuzzy.

O conceito de região de segurança é antigo. Em (WU e Kumagai 1982) esse conceito é definido como:

“Uma região de segurança é um conjunto de injeções de potência ativa e reativa (demandas de carga e gerações de energia) para os quais as equações de fluxo de potência e as restrições de segurança impostas pelo limites operacionais dos equipamentos estão satisfeitos.

A primeira proposta de um método baseado em direções radiais para determinação da região de segurança foi introduzida por (LIU 1986).

A região de segurança e conceitos associados à margem de segurança são os desafios que os planejadores e operadores de sistemas de energia enfrentam para garantir operações confiáveis de energia (MAKAROV, DU, et al. 2008).

Geralmente, os limites da região de segurança são funções não-lineares de parâmetros do sistema, restrições de segurança impostas, configuração do sistema e contingências envolvidas na análise. A região de segurança pode representar estabilidade de tensão, limite térmico (REPO 2001), (SU, et al. 2002), (LEE 2003), e (DOLLOFF, et al. 2008), estabilidade a pequenos sinais (LI, et al. 2002), ou estabilidade transitória (Zeng e Yu 2002), (YU, et al. 2004), (ZENG, YU e JIA 2005) e (DONG e YU 2005),.

Existe uma migração de métodos unidirecionais, que estimam a margem de estabilidade de tensão em uma direção especificada para métodos multidirecionais que exploram de forma completa a região de segurança de tensão (CERTS 2007).

O cálculo dos limites de segurança de estabilidade de tensão tem sido discutido em várias outras obras. Múltiplos índices de estabilidade de tensão e métodos para localizar e quantificar a margem de estabilidade de tensão têm sido sugeridos. Os métodos mais comuns incluem a abordagem de mínimos valores singulares, método de ponto de colapso, métodos de otimização, fluxo de potência continuado e fluxo de potência

repetido (DOBSON 1992), (BEGOVIC e PHADKE 1992), (DJUKANOVIC, SOBAJIC e PAO 1993). (CERTS 2007) e (HISKENS e DAVY 2001).

Em (MAKAROV, Du, et al. 2010) é apresentada uma revisão dos conceitos de região de segurança, além de uma metodologia de construção baseada em direções radiais, chamada de *Stress Direction*, e que apresenta os resultados através de nomogramas, mas nada é detalhado sobre o processo de construção dos mesmos.

Alguns trabalhos apresentam maiores detalhes sobre a construção das regiões de segurança. Estes trabalhos são, em sua maioria, dissertações de mestrado e trabalhos de conclusão de curso, onde são detalhados alguns desses processos, mas no entanto sem muita análise de eficiência (SANTA ROSA 2007), (BARBOSA 2009), (SANTOS 2010), (ALMEIDA 2011), (ABRANTES 2013). Mesmo assim não foram encontradas referências que abordassem a análise de eficiência computacional do processo de geração dos pontos da RSE

Por se tratar de um trabalho realizado a partir da funcionalidade de construção de regiões de segurança do ANAREDE, este trabalho aborda primordialmente o fundamento básico desta funcionalidade que é o cálculo da máxima transferência de potência entre regiões em regime permanente (BARBOSA 2009), (ALMEIDA 2011), (HENRIQUES, et al. 2011) e (ALVES 2012).

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este capítulo de introdução abordou o cenário atual dos sistemas de energia elétrica, os desafios encontrados pelos SEP's modernos, referências bibliográficas e alguns conceitos básicos importantes para o perfeito entendimento da criação de nomogramas. Também foram apresentadas a motivação e a origem deste trabalho, bem como seus objetivos.

No Capítulo 2 é apresentado o processo de construção das regiões de segurança utilizado no programa ANAREDE.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta ressaltando os pontos em que a mesma difere da abordagem tradicional, incluindo uma análise dos principais fatores que influenciam a construção das regiões de segurança.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da geração das RSEs para um sistema teste de 9 barras, e para uma configuração real do SIN, além de um comparativo de três situações de carregamento para outra configuração real do SIN. De modo complementar, destaca-se ao longo deste capítulo os principais fatores que influenciam no processo de construção e análise desta ferramenta.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões alcançadas ao longo do trabalho, considerações acerca de limitações da metodologia proposta e sugestões para trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2 REGIÃO DE SEGURANÇA ESTÁTICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma ferramenta computacional para VSA, alimentada com os dados de um SEP permite:

- Avaliar a segurança do ponto de operação atual, em condições normais (caso base), e em contingência;

- Avaliar a segurança de pontos de operação que representam alternativas de suprimento da carga, obtidos através de transferência de geração entre grupos de geradores, considerando critérios de segurança (perfil de tensão do sistema, margem de potência reativa dos geradores, entre outros);

- Identificar a máxima transferência de potência ativa entre regiões de interesse do sistema (grupos geradores, subsistemas, áreas geoeletricas, etc.);

O conceito de avaliação de segurança pode ser estendido e outras aplicações podem ser identificadas, tanto para ambiente *off-line*, como estudos de planejamento da expansão e operação do sistema, quanto para ambiente de tempo real, como centros de supervisão e controle (VOURNAS, et al. 2003), (CHAVES 2008), (QUADROS, et al. 2008), (YU, et al. 2008), (SANTOS 2010) e (SILVA NETO, et al. 2010).

A avaliação da segurança de tensão (VSA) utiliza técnicas de análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente, como a solução do fluxo de potência convencional, incluindo a modelagem de dispositivos de controle e limites (MONTICELLI, 1983), (PASSOS FILHO, 2000), a análise de contingências em regime permanente e fluxo de potência continuado, utilizado no cálculo da máxima transferência de potência entre regiões para determinação dos limites de intercâmbio (HENRIQUES, et al. 2011).

A RSE é uma representação pictórica dos resultados obtidos com as diversas técnicas utilizadas para avaliação de segurança estática. A definição, principais características e processo construtivo de RSEs são detalhados nas seções seguintes.

## 2.2 DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A Região de Segurança Estática (RSE) é uma importante ferramenta para avaliação da segurança de um SEP. A partir de um ponto de operação inicial e da definição de três grupos de geradores, é possível simular a transferência de geração entre dois destes grupos, considerando a carga constante. O resultado da avaliação da viabilidade de cada ponto de operação gerado permite montar um gráfico tridimensional que representa toda a região de operação segura do SEP no espaço  $G1 \times G2 \times G3$ , conforme ilustrado na Figura 3.

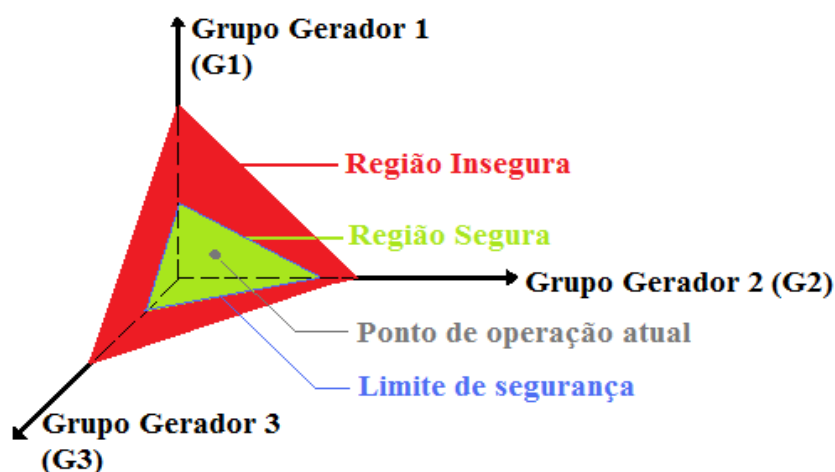


Figura 3 – RSE

Cada grupo gerador pode ser formado por uma unidade geradora, um conjunto de usinas, de uma área geoeletrica, um tipo de geração ou uma empresa, dependendo do tipo de análise que se deseja realizar. As fronteiras da região de segurança são definidas para um ponto de operação, a partir do qual são simulados deslocamentos da geração para o atendimento à carga, sendo esta considerada constante. Esses deslocamentos de geração são realizados até que algum limite seja violado. Desta forma, com uma simples inspeção visual é possível saber se o ponto de operação é seguro ou inseguro, e o quão distante o mesmo se encontra da fronteira da região segura.

Quando o ponto de operação está localizado dentro da envoltória (região segura), isto significa que o sistema está sendo operado com níveis de segurança apropriados, sem

violação dos critérios de segurança pré-estabelecidos (perfil de tensão das barras, limites de geração de potência reativa das máquinas, limites de carregamento dos circuitos, dentre outros). Em contrapartida, um ponto de operação localizado fora da envoltória (região insegura) caracteriza a violação de critério de segurança listado anteriormente e algum nível de risco para o SEP. Assim, a região de segurança é o “lugar geométrico” dos possíveis despachos de geração que atendem aos critérios de segurança para operação do SEP, considerados os grupos de geração especificados.

A razão de se definir apenas três grupos de geração está relacionada, entre outras coisas, com a visualização de resultados. É possível dividir o sistema em mais do que três grupos de geração, mas isso tornaria impossível a visualização dos resultados e demandaria maior esforço computacional.

As fronteiras da região segura são definidas como sendo a interseção dos limites de segurança avaliados para cada ponto de operação gerado durante o processo, como mostrado na Figura 4.

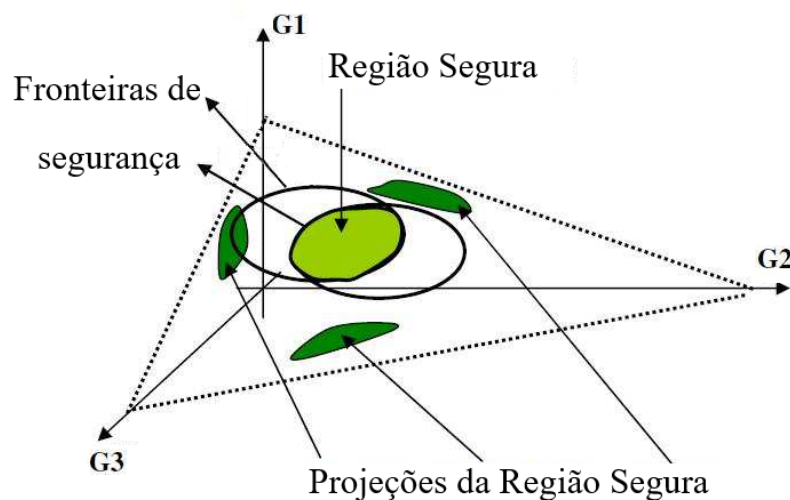


Figura 4 – Fronteiras da Região Segura

A projeção da região de segurança em cada um dos três planos dá origem aos gráficos, denominados nomogramas. A utilização de nomogramas em problemas envolvendo segurança de tensão de SEPs é demonstrada em (SARMIENTO, et al. 2009). A Figura 5 ilustra cada um dos 3 nomogramas criados a partir da projeção da região de segurança.

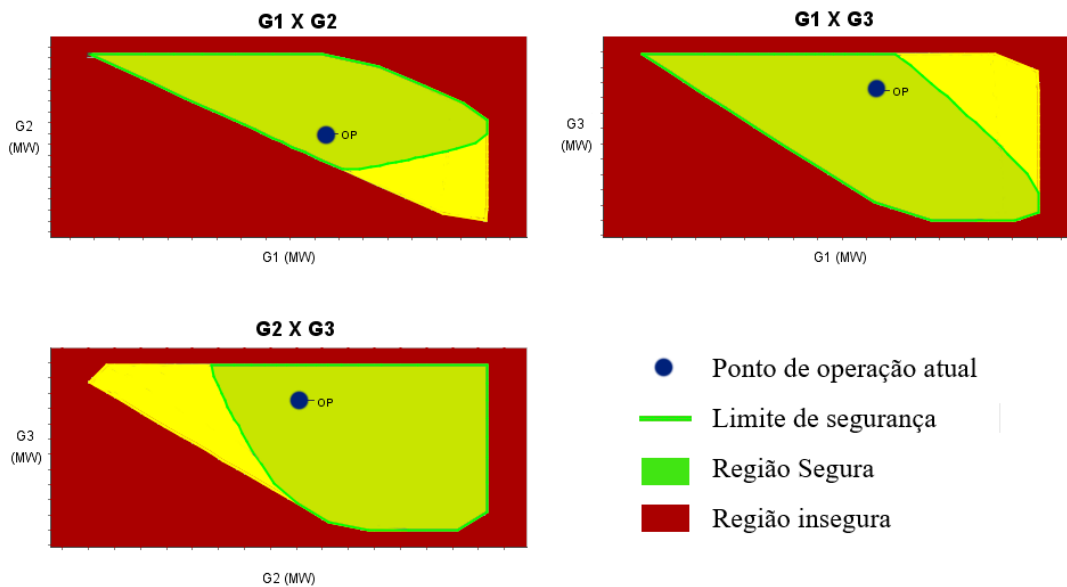


Figura 5 – RSE: Projeções nos Planos G1xG2, G1xG3 e G2xG3

### 2.3 PROCESSO CONSTRUTIVO

A construção de uma RSE pode ser dividida em quatro etapas, a saber:

- Definição das regiões exportadora e importadora e dos grupos de geração G1 (folga), G2 (região exportadora) e G3 (região importadora);
- Determinação dos fatores de participação;
- Transferência de geração entre as regiões importadora e exportadora e avaliação dos pontos de operação gerados;
- Construção gráfica da RSE a partir dos resultados.

Cada uma destas etapas será descrita minuciosamente a seguir.

### 2.3.1 Etapa I: Definição das Regiões Exportadora e Importadora e dos Grupos de Geração G1 (Folga), G2 e G3

Para a construção da região de segurança é necessário, primeiramente, definir três grupos de geração. Os grupos G1, G2 e G3 são distribuídos em áreas exportadora e importadora e que terão suas gerações de potência ativa alteradas durante o processo de construção da região de segurança. O grupo G1 é formado por um conjunto de geradores de “referência”, que é utilizado para o fechamento de balanço de carga e geração do SEP. A carga é considerada constante, a não ser pelas perdas, que variam a cada novo despacho de geração obtido durante o processo de transferência de geração. A Figura 6 ilustra de forma genérica o processo de definição dos grupos de geração de um SEP.

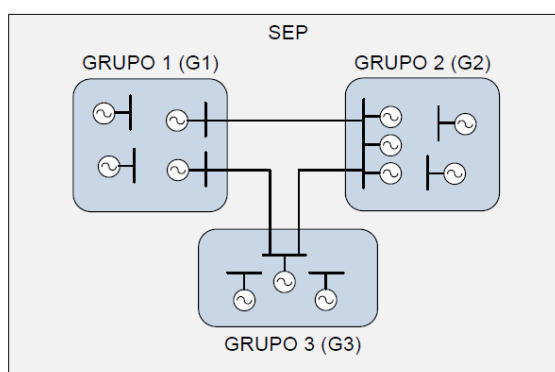


Figura 6 – Definição dos Três Grupos de Geração de um SEP

A construção da RSE é baseada no cálculo da máxima transferência de potência entre duas regiões geradoras. De acordo com (BARBOSA 2009) e (HENRIQUES, et al. 2011), essa metodologia requer uma divisão do SEP em duas regiões:

- Região exportadora (REXP): composta pelas barras de geração cujas gerações de potência ativa sofrerão acréscimos;

- Região importadora (RIMP): composta pelas barras de geração cujas gerações de potência ativa serão diminuídas.

O funcionamento da ferramenta consiste em realizar modificações no d de geração do sistema através da transferência de potência entre as regiões exportadora (REXP) e importadora (RIMP), até que ocorra alguma violação dos critérios de segurança pré-

estabelecidos, como por exemplo, no nível de tensão das barras. Essas modificações são feitas a partir de um passo de transferência de geração, que define o aumento da geração de potência ativa na região exportadora e a respectiva redução de geração na região importadora. Este passo de transferência de geração representa o quanto de geração será transferido entre as regiões importadora e exportadora a cada iteração do processo de construção da região de segurança. A Figura 7 ilustra o funcionamento da ferramenta.

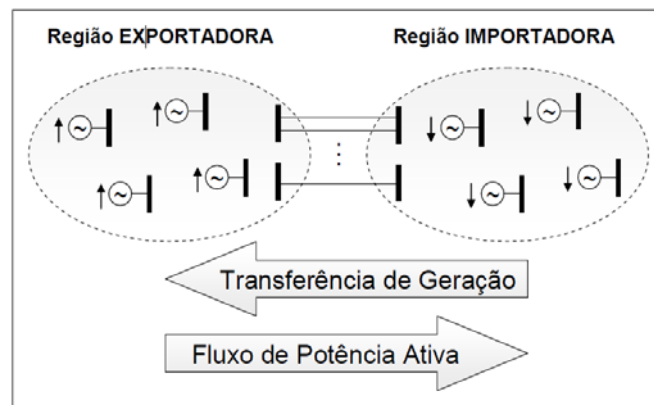


Figura 7 – Processo de Transferência de Geração

A Figura 8 representa, de maneira bastante simplificada, o fluxograma do algoritmo utilizado pela ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência. A entrada de dados é composta pela seleção das barras pertencentes a cada região, pela escolha do passo de transferência (PSSO) (ALMEIDA 2011) e pelo montante de geração da região importadora que se deseja transferir para a região exportadora (PMTG), ambos em valores percentuais.

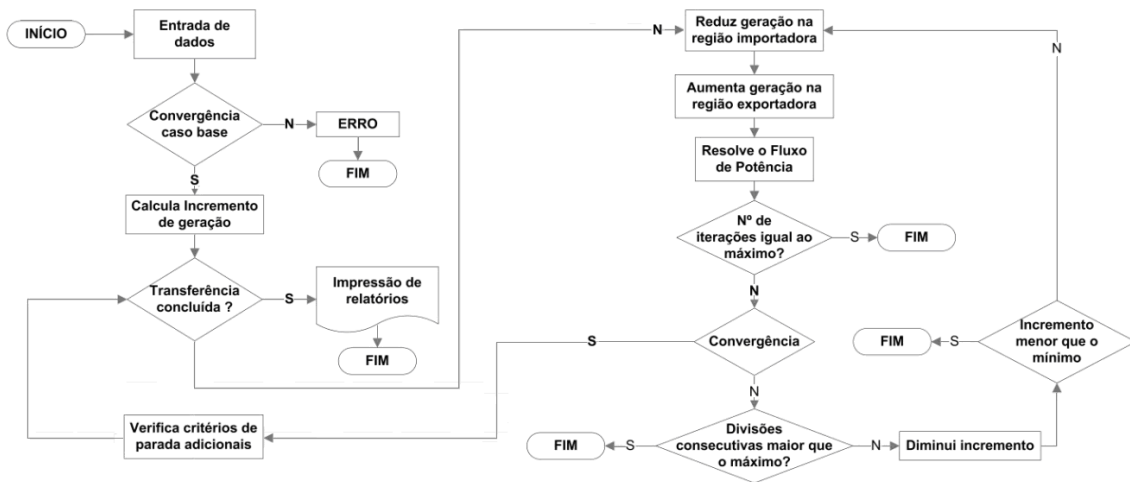


Figura 8 – Fluxograma Simplificado da Metodologia para Determinação dos Limites de Transferência

Como essa ferramenta pressupõe a transferência de potência entre regiões importadora e exportadora, o uso da mesma com os grupos de geração G1, G2 e G3 requer que se aglutine dois grupos de geração em uma mesma região, importadora ou exportadora. Isso dependerá da direção em que ocorrerá a transferência de potência. Ou seja, grupos que terão sua geração de potência ativa aumentada farão parte da região exportadora, assim como os grupos que terão sua geração de potência ativa reduzida farão parte da região importadora.

Um exemplo seria uma situação em que haja a transferência de potência da região exportadora formada pelos grupos de geração G1 e G2, para a região importadora formada por G3. Nesse caso, os grupos de geração G1 e G2 aumentarão a potência ativa gerada a cada passo, enquanto no grupo G3 ocorrerá redução da geração, de forma a manter o balanço entre carga e geração (considerando-se as variações nas perdas elétricas). Esse exemplo é ilustrado na Figura 9.

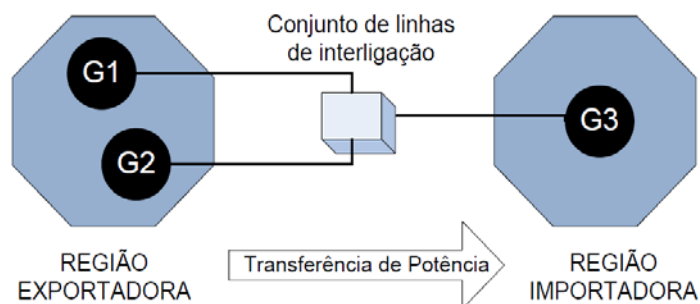


Figura 9 – Exemplo de Definição das Regiões Exportadora (REXP) e Importadora (RIMP)

Sendo assim, a construção gráfica da Região de Segurança consiste no agrupamento de sucessivas soluções de cálculos da máxima transferência de potência entre duas regiões do sistema.

### 2.3.2 Etapa II: Determinação dos Fatores de Participação

No processo de construção da RSE, o montante de geração a ser transferido da região exportadora para a importadora é determinado por um passo transferência de geração. Quando o grupo de geração é formado por mais de uma unidade geradora, surge a necessidade de se determinar o percentual de contribuição de cada unidade. A esse percentual de contribuição de cada unidade dá-se o nome de Fator de Participação Individual (FPI).

A utilização de três grupos de geração no modelo de transferência de potência entre duas regiões, requer que dois grupos geradores componham uma das regiões. Com isso é necessário que se determine a parcela de geração de cada um desses grupo no total da região. A essa parcela de contribuição de cada grupo de geração dá-se o nome de Fator de Participação por Grupo (FPG).

O detalhamento dos cálculos de ambos os fatores de participação pode ser encontrado em (ALMEIDA, 2011).



### 2.3.3 Etapa III: Transferência de Geração entre as Regiões Importadora e Exportadora e Avaliação dos Pontos de Operação Gerados

O definição dos grupos de geração e das regiões exportadora e importadora dependerá da direção de transferência de potência que se deseja considerar. Como a RSE é representada por um plano tridimensional, podemos adotar um conjunto de direções partindo do ponto de operação (caso base) que se estenderão até as fronteiras determinadas pelos limites de geração ou de segurança. Dessa forma podemos aplicar a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência a essas direções, respeitando apenas o balanço de potência ativa (exceto devido à variação das perdas elétricas do sistema de transmissão) e os limites de geração de potência ativa máxima e mínima de cada grupo.

Apesar da RSE ser representada por um plano num espaço tridimensional, sua visualização para efeito de avaliação de segurança se torna mais útil quando feita através da projeção da RSE nos planos formados pelos eixos G1, G2 e G3 combinados dois a dois. Com isso temos nomogramas nos planos G1xG2, G1xG3 e G2xG3. Para demonstrar todo o procedimento, será escolhido o plano G2xG3 para a transferência de geração potência ativa entre as regiões exportadora e importadora, pois G1 representa o grupo de folga. O grupo não pertencente ao plano selecionado (G1) terá sua geração aumentada ou reduzida quando for necessário, fechando o balanço entre carga e geração do sistema. O nomograma do plano G2xG3 é exibido na Figura 10.

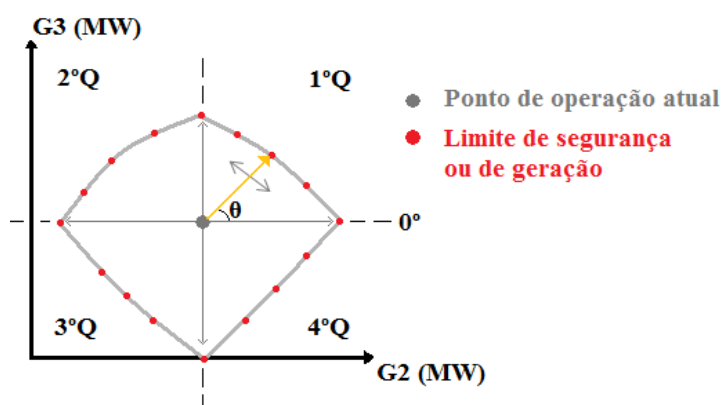


Figura 10 – Nomograma do Plano G2xG3

Os diversos despachos de geração dos grupos podem ser obtidos caminhando-se em diferentes direções em G2xG3 a partir do ponto de operação inicial (caso base). Com isso, cada grupo terá sua geração de potência ativa aumentada, ou reduzida, mantendo o atendimento a uma carga constante.

Dependendo da direção ao longo da qual será aplicada a ferramenta de máxima transferência de potência, uma diferente configuração das regiões de exportação e importação ocorrerá. Com isso, torna-se necessária uma análise dos quadrantes do plano cartesiano a que pertencem essas direções a fim de se determinar os agrupamentos por regiões. A partir da análise feita por (ALMEIDA 2011) temos a Tabela 1 que resume todos os cenários de geração possíveis para a definição das regiões.

Tabela 1 – Definição das Regiões Exportadora e Importadora: Cenários Possíveis

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

A partir da definição do número de direções, o vetor de ângulo é automaticamente criado. Para cada direção definida pelo vetor de ângulos, é definida a composição das regiões REXP e RIMP com base na Tabela 1. Calcula-se então os fatores de participação necessários, A partir daí, se inicia a busca pelos limites de transferência e avaliação de segurança.

O processo de avaliação de segurança se inicia a partir do ponto de operação no caso base e que corresponde a solução de um fluxo de potência convencional. Este ponto de operação é submetido a uma análise de contingências em regime permanente, utilizando uma lista de contingências mais severas e/ou mais prováveis. O objetivo é verificar se o caso atende ao critério  $(N - 1)$ , ou seja, se o sistema é capaz de atender a critérios de segurança de tensão, carregamento, geração de potência reativa, etc., mesmo em situação de contingência. A utilização de uma lista de contingências mais severas ou mais prováveis tem o objetivo de manter o esforço computacional em níveis razoáveis.

Assim, de posse da ferramenta para cálculo da máxima transferência de potência entre regiões, inicia-se a transferência de potência de REXP para RIMP, de acordo com o passo de transferência adotado e os FPG's e FPI's já calculados. Com isso, o perfil de geração do sistema é modificado sem, no entanto, desrespeitar o balanço de potência ativa entre geração e carga.

Posteriormente, resolve-se novamente o fluxo de potência para o novo ponto de operação (novo cenário de geração), processando automaticamente outra análise de contingências com base na mesma lista de contingências utilizada na avaliação do caso base. Verificada a convergência do fluxo de potência novamente, pré e pós-contingência, monitora-se a segurança e as condições operativas em regime permanente do sistema por meio da observância de determinados critérios, denominados critérios de segurança.

Os critérios de segurança e os procedimentos para sua verificação estão detalhados em (ALMEIDA 2011).

#### 2.3.4 Etapa IV: Construção Gráfica da RSE a Partir dos Resultados

O processo de transferência de geração entre as regiões importadora e exportadora e a avaliação dos pontos de operação gerados em todas as direções de transferência pré-definidas, descritos no item anterior, armazena dados dos limites violados em cada

direção. A partir desses dados é feita a construção gráfica da RSE através da interligação dos pontos limites associados a um mesmo critério de segurança. Sabendo que mais de um critério de segurança pode ser violado numa mesma direção, o contorno da região segura é construído interligando os limites operativos mais restritivos (primeiro critério de segurança violado) de cada direção. Como resultado final, tem-se o gráfico completo que representa a RSE. A Figura 11 exemplifica uma construção gráfica da RSE onde temos apenas os limites de geração e tensão avaliados. A área interna à curva limite de tensão é considerada região de operação segura. A área externa à curva limite de tensão é considerada uma região de operação insegura, ainda que o limite de geração não tenha sido alcançado.

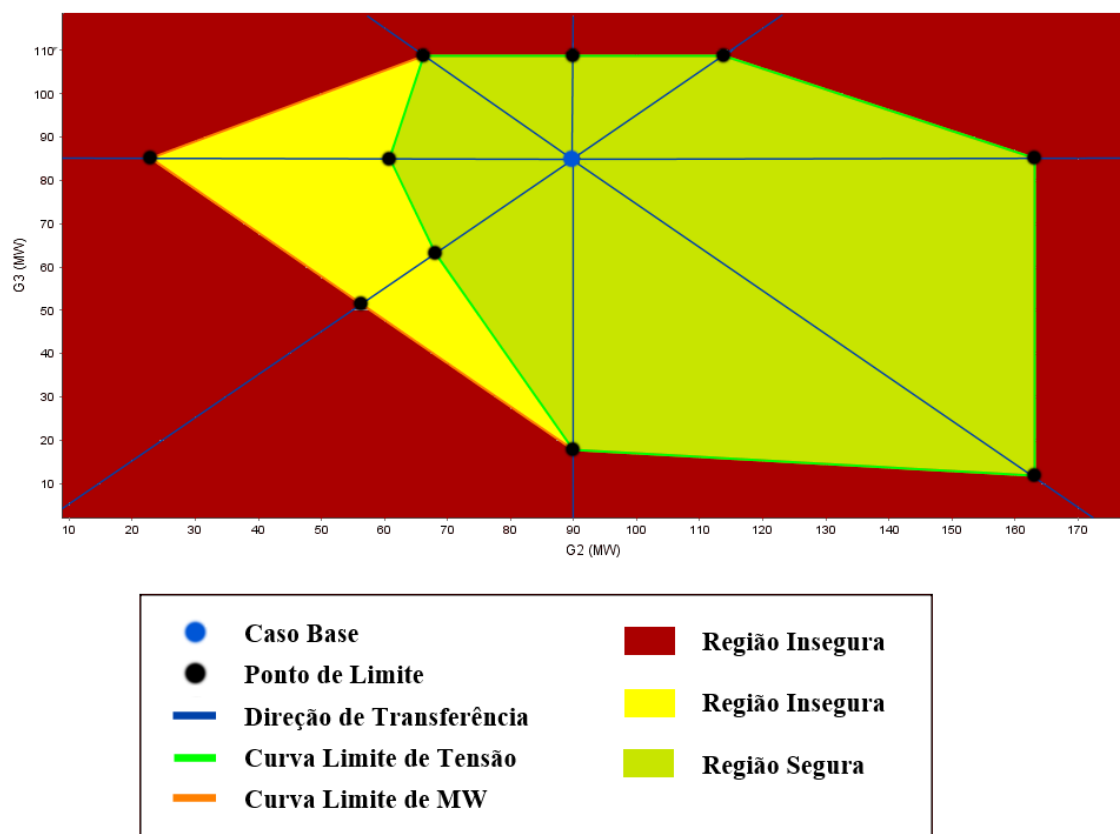


Figura 11 – Construção Gráfica da RSE

É importante ressaltar que quanto maior o número de direções, melhor definido é o contorno da região segura nos nomogramas, em função da maior quantidade de cenários de transferência considerados. Um pequeno número de direções pode gerar a RSE do SEP

com precisão insatisfatória para estudos de avaliação da segurança estática, o que, de fato, é crítico em um SEP real.

Da mesma forma, o passo de transferência de geração influi no refinamento dos pontos das curvas limite. Um passo de transferência grande pode produzir resultados mais conservadores deixando as regiões de segurança menores do que realmente são.

As considerações e comparações a respeito desses dois fatores, os quais influenciam fortemente a forma da RSE serão detalhadas nos itens a seguir e no capítulo de resultados.

A curva em verde claro indica violação do limite de tensão. Quando não há limites violados, a região é colorida com um verde mais escuro. Quando apenas um dos limites de tensão ou térmico é violado, a região é colorida de um verde mais claro e quando os limites de tensão e térmico são simultaneamente violados, a região é colorida de amarelo.

As violações são consideradas para qualquer elemento do sistema sob monitoração. Neste exemplo todos os elementos foram monitorados. Os limites de tensão, térmico e de geração de potência reativa são verificados tanto para o caso base quanto para os casos de contingências. No visualizador de resultados é possível a identificação de qual contingência causou a violação ou se esta ocorreu já no caso base. Como a violação do limite de geração de potência reativa de alguma máquina, delimitado pela curva marrom, não representa uma restrição direta à operação, não há alteração de cor de preenchimento devido a este limite. Por outro lado, a curva laranja delimita a região, também colorida de laranja, na qual alguma contingência violou a capacidade máxima de transferência de potência (atingiu o limite de estabilidade de tensão). A curva vermelha delimita a região que indica onde foi excedida a máxima geração de potência ativa no caso base.

## 2.4 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE DIREÇÕES

De acordo com (ALMEIDA 2011), o número de direções influi diretamente na precisão do traçado da região de segurança e, obviamente, no custo computacional. Esta afirmação é, de certa forma, óbvia, mas as conclusões relacionadas com o número adequado de direções para a obtenção de uma região de segurança razoavelmente precisa se baseiam apenas do Sistema 9 Barras, o que é insuficiente para se inferir uma regra

geral. O número mínimo de direções pode variar dependendo do carregamento do sistema, da distribuição dos geradores, do número e tipo das contingências a serem analisadas, etc.

À medida que ocorre o processo de transferência de geração entre as regiões exportadora e importadora, os pontos de operação gerados e correspondentes a novos despachos de geração capazes de atender à carga do sistema se afastam do ponto de operação. É razoável afirmar que, se considerarmos um mesmo SEP, em regime de carga pesada o espaço de soluções viáveis é menor que aquele que seria observado em regime de carga leve. Assim, em carga pesada, os limites de geração ficam mais próximos do ponto de operação inicial e a distância entre pontos de mesma cardinalidade sobre direções de transferência de geração adjacentes não é excessiva. Da mesma forma, é razoável supor que em condições de carga leve, os limites do espaço de busca serão maiores, assim como a distância entre o último ponto viável de cada direção de transferência de geração e o ponto de operação inicial. Nesta situação, a distância entre pontos de mesma cardinalidade sobre direções de transferência de geração adjacentes aumenta significativamente, criando uma área de incerteza quanto à viabilidade de um ponto de operação situado sobre uma hipotética direção de transferência de geração intermediária.

Em um ambiente de planejamento, onde não há compromisso com tempo de execução, um número elevado de direções proporcionará um contorno mais suave e detalhado da região de segurança. No entanto, em um ambiente de operação em tempo real existe uma janela de tempo bem definida e uma clara relação de compromisso entre a precisão do traçado da região de segurança e o tempo máximo para a geração do nomograma. Os métodos analisados durante a pesquisa bibliográfica não fornecem elementos para estimar o esforço computacional do traçado da região de segurança e compatibilizar o número de direções especificado e a capacidade de processamento disponível.



torna-se dependente da carga em que o sistema se encontra. Em um cenário de carga pesada este valor é maior do que o valor num cenário de carga leve.

Para exemplificar o problema foi utilizada uma configuração real do SIN. Utilizou-se o banco de dados do ANAREDE/ANATEM correspondente ao “ONS – MENSAL –DEZEMBRO 2011 – PESADA”. Para definição dos grupos de geração G1, G2 e G3, é utilizado como referência o trabalho desenvolvido em (QUADROS, et al. 2008), porém utilizando o atual cenário do sistema brasileiro, onde G1 compreende as usinas do Rio Grande, G2 compreende as usinas da Bacia do Paranaíba, e G3 compreende a região central de Minas Gerais (G3). Destes grupos extraímos as capacidades máxima e mínima de geração dos grupos como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Limites Globais de Geração

Limites de Geração Globais		
Grupo	Máximo (MW)	Mínimo (MW)
G1	6896	0
G2	11092	0
G3	2014	0

Em seguida, considerando a demanda do sistema com carga leve e carga pesada, calculamos as participações mínima e máxima de cada grupo para cada regime de carregamento. Podemos notar que a geração máxima de G2 em carga leve ultrapassa o valor da demanda, ficando, dessa forma, limitado a este valor. Em carga pesada, as gerações dos grupos combinadas dois a dois não é suficiente para suprir a demanda. Dessa forma cada um dos grupos tem uma contribuição mínima de geração o que diminuí consideravelmente o *range* de geração de potência ativa de cada grupo na busca por soluções viáveis. Os valores mínimo e máximo de geração por grupo de gerador são apresentados na Tabela 3.



Tabela 3 – Limites de Geração por Espaço de Busca (MW)

Grupo	Carga Leve				Carga Pesada			
	Ponto de Operação	Demanda	Máximo	Mínimo	Ponto de Operação	Demanda	Máximo	Mínimo
G1	2758	8168	6896	0	6553	18716	6896	5610
G2	4742		8168	0	10251		11092	9806
G3	668		2014	0	1912		2014	728

O cálculo do incremento de geração no ANAREDE é feito tomando como base o valor da geração do grupo no ponto de operação. De posse desse valor e do *range* de geração de cada grupo, podemos calcular o incremento de geração. Na Tabela 4, podemos perceber um aspecto negativo dessa abordagem em função da existência de inversão de proporcionalidade. O regime de carga leve tem um espaço de busca grande e um incremento de geração pequeno, o que obriga a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre regiões a executar muitos passos até encontrar o limite de geração. Em contrapartida, em carga pesada, o incremento de geração é grande quando comparado com um espaço de busca reduzido. Isto não só é ineficiente, como implica em uma diminuição da precisão justamente na situação em que a transferência de geração deveria ocorrer com passos menores.

Tabela 4 – Comparativo dos Incrementos de Geração

Passo de Transferência	Carga Leve				Carga Pesada			
	Geração de Referência (G1) (MW)	Incremento de Geração (MW)	Espaço de Busca (Eixo G2)	Passos no Espaço de Busca	Geração de Referência (G1) (MW)	Incremento de Geração (MW)	Espaço de Busca (Eixo G2)	Passos no Espaço de Busca
1	2758	27,6	8168	296,2	6553	65,5	1286	19,6
2		55,2		148,1		131,1		9,8
3		82,7		98,7		196,6		6,5
4		110,3		74,0		262,1		4,9
5		137,9		59,2		327,7		3,9

Esse problema poderia ser amenizado com diferentes configurações de passos de transferência para diferentes perfis de carregamento. Porém, para uma mesma demanda, podemos ter diferentes despachos de geração de potência ativa para os grupos de geração, o que acarretaria em valores diferentes para o incremento de geração, levando novamente a uma situação imprevisível.

Neste capítulo foram apresentadas as definições e características do processo de construção da RSE. Também foram apresentadas algumas desvantagens relacionadas com a natureza radial das direções de transferência de geração de potência ativa entre grupos de geradores comumente utilizadas na literatura. Finalmente, foram abordadas dificuldades em relação à determinação da precisão da varredura do espaço de busca e à previsibilidade do esforço computacional necessário para a construção da RSE.

## CAPÍTULO 3 - CONSTRUÇÃO DA RSE POR DIREÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE GERAÇÃO RAMIFICADAS

### 3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A principal deficiência do modelo de construção da região de segurança baseado em direções radiais é a distribuição irregular dos pontos de operação gerados pelo processo de transferência de geração (doravante denominados patamares de geração) sobre o espaço de busca de soluções viáveis. Este modelo faz com que a região próxima ao ponto de operação inicial seja super avaliada, enquanto em regiões mais afastadas deste ponto, nas quais a distância entre dois pontos de mesma cardinalidade sobre direções de transferência de geração adjacentes aumenta, os patamares tenham uma distribuição bastante esparsa, criando uma grande zona de incerteza, como mostra a Figura 13.

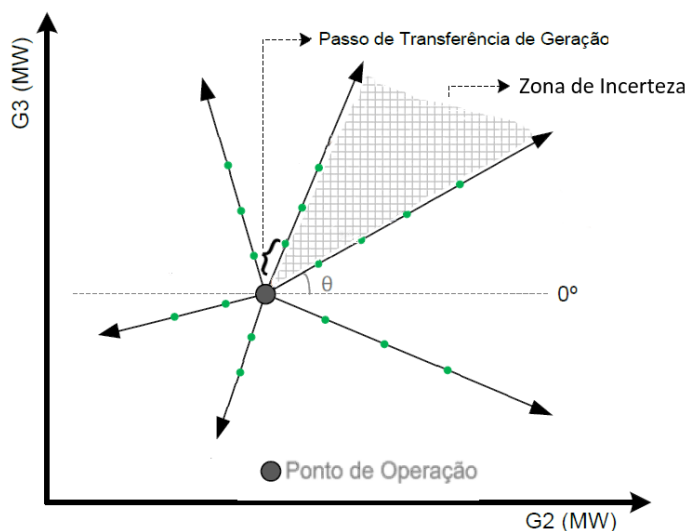


Figura 13 – Zona de Incerteza

Os nomogramas gerados para visualização da RSE apenas apresentam as curvas limite e correspondem a um contorno gerado pela ligação de pontos sobre as direções de transferência de geração. Isso fornece uma falsa informação de segurança, já que não há qualquer garantia sobre a viabilidade de pontos de operação situados na zona de incerteza. É importante ressaltar que a falsa informação de segurança tanto pode ser otimista quanto pessimista, ou seja, o ponto de mesma cardinalidade sobre uma hipotética direção de transferência intermediária tanto pode estar abaixo quanto acima da linha que interliga

pontos sobre duas direções de transferência de geração efetivamente utilizadas na construção do nomograma. O principal objetivo da metodologia proposta é implementar uma distribuição homogênea dos patamares de geração, tornando-os equidistantes em relação aos patamares adjacentes, minimizando a zona de incerteza e permitindo uma razoável previsibilidade em relação ao esforço computacional necessário para varrer o espaço de busca de soluções viáveis.

### 3.2 – METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta para a minimização das zonas de incerteza inerentes ao método baseado em direções de transferência de geração radiais tem como ideia central a distribuição dos patamares sobre uma malha triangular homogênea, na qual os lados dos triângulos são do tamanho do passo de transferência de geração calculado (doravante denominado passo de geração). Além de minimizar o problema com a zona de incerteza, essa abordagem também evita a super avaliação da região próxima ao ponto de operação inicial, como mostra a Figura 14.

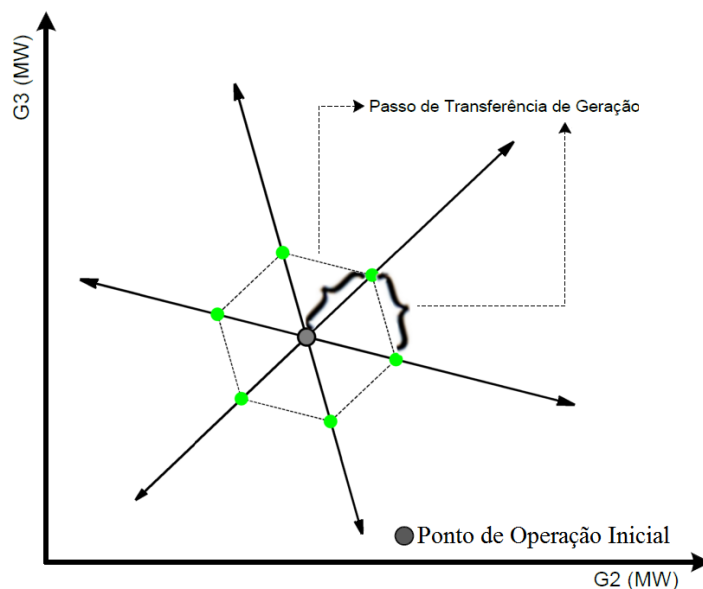


Figura 14 – Primeiro Nível da Malha de Patamares de Geração

À medida que aumenta a distância entre os patamares de geração e o ponto de operação inicial, o aumento na definição das curvas fica mais evidente. Novos triângulos

são criados sobre o que seria a zona de incerteza do método baseado em direções radiais de transferência de geração, formando uma malha homogênea como mostra a Figura 15.

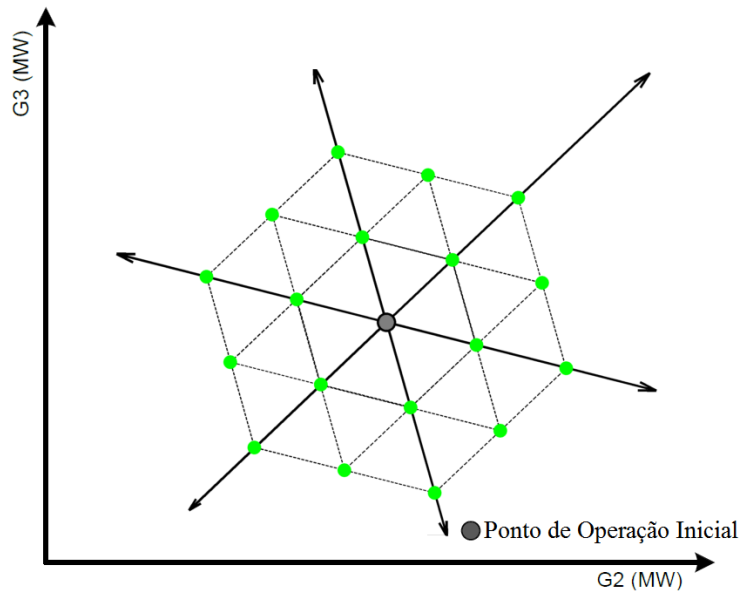


Figura 15 – Segundo Nível da Malha de Patamares de Geração

Considerando a distribuição dos pontos de operação sobre uma malha homogênea, podemos introduzir o conceito de nível de patamares de geração. Dois níveis de patamares de geração distam entre si o equivalente a um passo de geração e cada nível tem sua quantidade de patamares aumentada à razão de 6 patamares em relação ao nível anterior como mostra a Tabela 5. Desta forma, fica evidente o aumento da precisão das curvas limite proporcionado pela metodologia proposta. Como a distância entre os dois níveis consecutivos é dependente do passo de geração, a quantidade de patamares de geração passa a ser diretamente influenciada apenas por esta grandeza, diferentemente do modelo baseado em direções de transferência de geração radiais, no qual o número de direções também influencia a quantidade de patamares de geração.

Tabela 5 – Evolução da Quantidade de Patamares de Geração por Nível da Malha

Nível	Patamares por Nível	Total de Patamares
1	6	6
2	12	18
3	18	36
4	24	60
5	30	90
6	36	126
7	42	168
8	48	216
9	54	270
10	60	330

A estratégia de implementação da malha homogênea de patamares de geração requer compatibilidade com a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre regiões. Esta ferramenta trabalha seguindo uma direção de transferência de geração a partir de um ponto de operação inicial, gerando novos patamares até que o limite de transferência de geração seja alcançado.

### 3.3 – IMPLEMENTAÇÃO

As etapas iniciais do processo de construção (definição das regiões importadora e exportadora e dos grupos de geração e determinação dos fatores de participação) são iguais às do método baseado em direções de transferência de geração radiais descrito no capítulo anterior. A diferença está na forma como é feita a construção gráfica da RSE.

A implementação da metodologia proposta requer que a malha de patamares seja percorrida pela ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre regiões. Diversas abordagens para resolver essa questão foram consideradas, tendo como ponto comum a divisão da região de segurança em seis setores devido aos seis patamares existentes no primeiro nível, a saber:

- Percorrer os setores da malha passando por cada patamar de cada nível antes de avançar para o nível mais externo. Essa estratégia se assemelha a um “zig-zag”, como mostra a Figura 16. Apesar de viável do ponto de vista de implementação, essa estratégia foi descartada devido a vários aspectos negativos, tais como: necessidade de recalcular

os fatores de participação a cada patamar gerado, posterior na identificação dos eventuais limites violados para criação do nomograma e limitação na estratégia de paralelização a apenas seis processos paralelos.

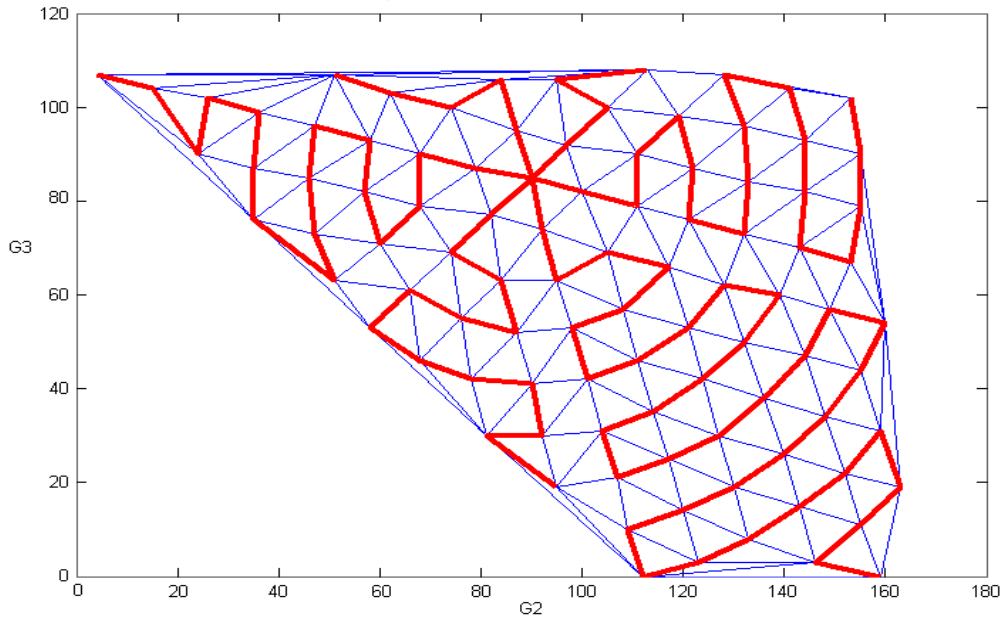


Figura 16 – Malha de Patamares Percorrida por Nível Separadamente

- Percorrer os setores da malha explorando cada uma das seis direções de partida. A cada patamar criado em cada uma dessas seis direções, uma nova direção seria criada a 60 graus à esquerda da direção básica do setor, como mostra a Figura 17. Essa estratégia é viável do ponto de vista de implementação, permite um médio grau de paralelização, além de uma menor dificuldade na identificação dos eventuais limites violados para criação do nomograma. Apesar disso, essa estratégia foi descartada pela possibilidade de uma curva limite ficar localizada entre duas ramificações. Nesse cenário, não haveria a aproximação dos limites causando uma menor cobertura da RSE em relação aos limites de segurança.

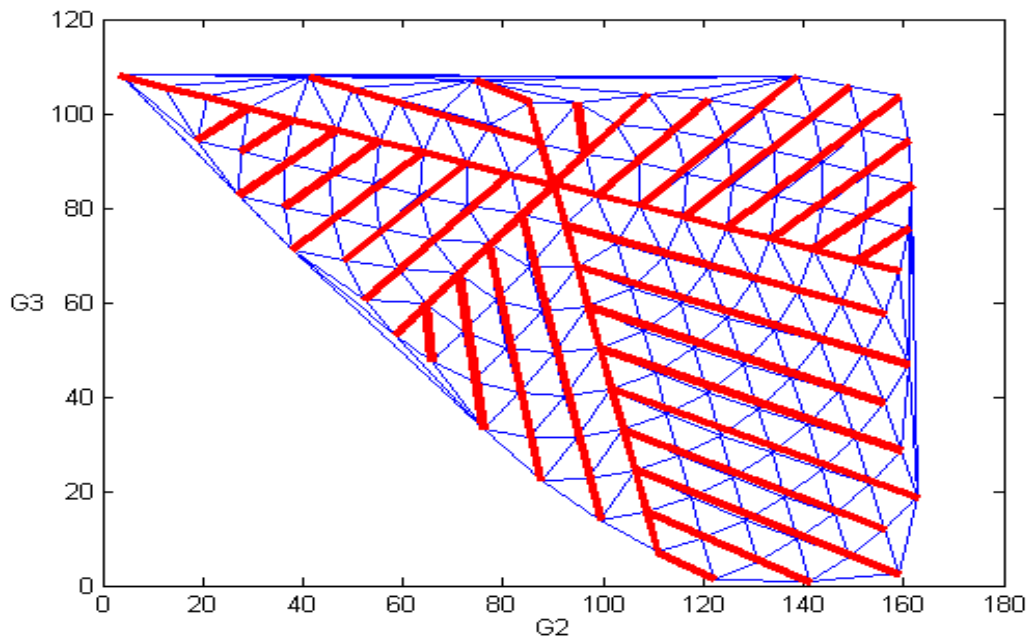


Figura 17 – Malha de Patamares Percorrida por 1 Ramificação

### 3.4 - SUBSTITUIÇÃO DAS DIREÇÕES RADIAIS POR SETORES COM DIREÇÕES RAMIFICADAS

Para a construção dessa malha, a região de segurança é dividida em seis partes denominadas de setores, cada uma contendo uma direção base defasada de 60 graus da direção base do setor adjacente. O algoritmo de construção é dividido em três etapas. O fluxograma de gerenciamento dessas etapas é mostrado a seguir, na Figura 18.



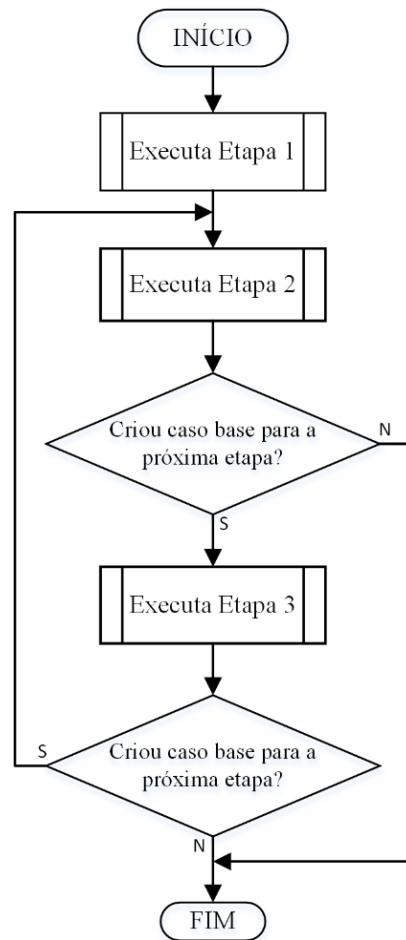


Figura 18 – Fluxograma do Gerenciamento das Etapas

### 3.4.1 - Etapa 1 – Avaliação do Caso Base

Nesta etapa apenas o ponto de operação gerado pela solução de um fluxo de potência convencional (caso base) é avaliado. É realizada uma análise de contingências em regime permanente, utilizando uma lista de contingências mais severas e/ou mais prováveis. O objetivo é verificar se o caso base atende ao critério  $(N - 1)$ , ou seja, se o sistema é capaz de suportar as contingências da lista sem violações dos critérios de operação que, no caso presente, incluem violações de tensão, carregamento em circuitos e geração de potência reativa.

### 3.4.2 - Etapa 2 – Direção Paralela à Direção Base do Setor

Nesta etapa determina-se o ângulo da direção que a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência deve seguir. Para o primeiro setor, o ângulo da direção é de 45 graus em relação ao eixo G2. Para os demais setores, os ângulos das direções base são desafiados de 60 graus em relação à direção base do setor anterior. Calcula-se então os fatores de participação (FPG e FPI), e tem início processo de transferência de geração da região exportadora (REXP) para a região importadora (RIMP), seguindo a direção sob análise. Basicamente, é realizado um incremento de geração de potência ativa das máquinas pertencentes à região REXP, simultaneamente com um decréscimo, da geração de potência ativa das máquinas pertencentes à região RIMP, de acordo com o passo de geração adotado. Com isso, o despacho de geração do sistema é modificado, sem, no entanto, desprezar o balanço de potência ativa entre geração e carga.

O problema de fluxo de potência é resolvido para o novo ponto de operação (novo patamar de geração), seguido da análise de contingências com base na mesma lista de contingências utilizada para validação do caso base. Os critérios de segurança são avaliados para o novo ponto de operação, em condições normais e sob contingência. Verificada novamente a convergência do fluxo de potência, pré e pós-contingência, monitora-se a segurança e se as condições operativas atendem aos critérios de segurança. A cada violação de limite, ou não convergência do fluxo de potência, a estratégia de bisseção do incremento de geração é aplicada. Tem-se aqui um importante modificação realizada na ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência ativa em relação ao método de direções radiais. Após a determinação de algum limite, o incremento de geração para estabelecer o próximo patamar a ser avaliado é calculado de forma que este patamar se localize num ponto da malha triangular homogênea. A geração de novos patamares de geração prossegue até que a convergência do fluxo de potência não seja mais obtida ou o montante de geração especificado tenha sido integralmente transferido para a área exportadora. Ao final desta etapa, se houve sucesso na criação de um patamar a uma distância de um incremento de geração do caso base desta etapa, este patamar será utilizado como caso base da Etapa 3. Caso contrário, o setor estará terminado.

Após o término dessa etapa é obtido um gráfico como o mostrado na Figura 19.

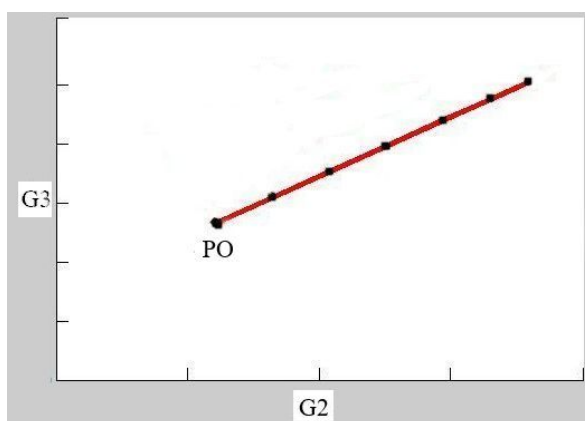


Figura 19 – Gráfico da etapa 2

O fluxograma da etapa 2 é mostrado na Figura 20.

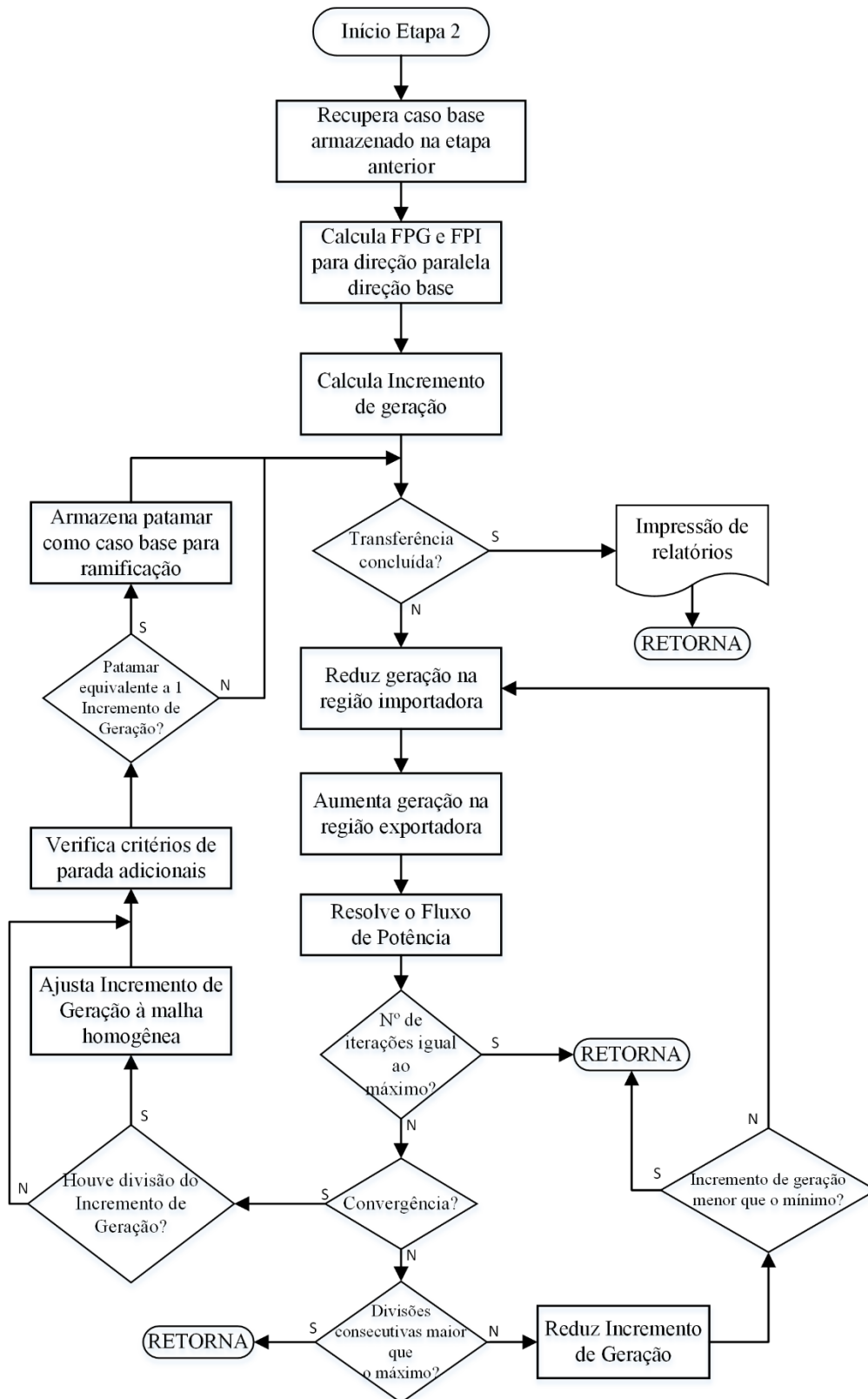


Figura 20 – Fluxograma da Etapa – Direção Paralela à Direção Base

### 3.4.3 - Etapa 3 – Direção Defasada de 60 graus da Direção Base do Setor

A partir do caso base estabelecido na Etapa 2, uma nova direção de transferência de geração é adotada, defasada de um ângulo de 60 graus em relação à direção utilizada na Etapa 2. Calculam-se os FPG's e FPI's para essa nova direção. De forma análoga à Etapa 2, é iniciado o processo de transferência de geração, com a geração de sucessivos patamares de geração e a monitoração das condições operativas.

Após o término dessa etapa tem-se um gráfico como mostrado na Figura 21.

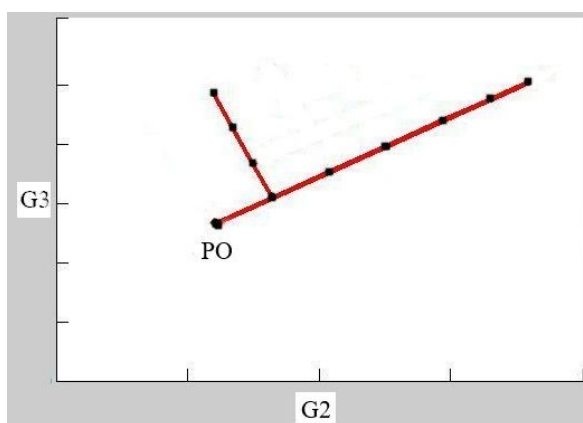


Figura 21 – Gráfico da etapa 3

Ao final dessa etapa, se houve sucesso na criação de um patamar a uma distância de um incremento de geração do caso base desta etapa, a Etapa 2 será executada novamente e este patamar será utilizado como caso base. Caso contrário, o setor estará terminado. O fluxograma desta etapa é mostrado na Figura 22.

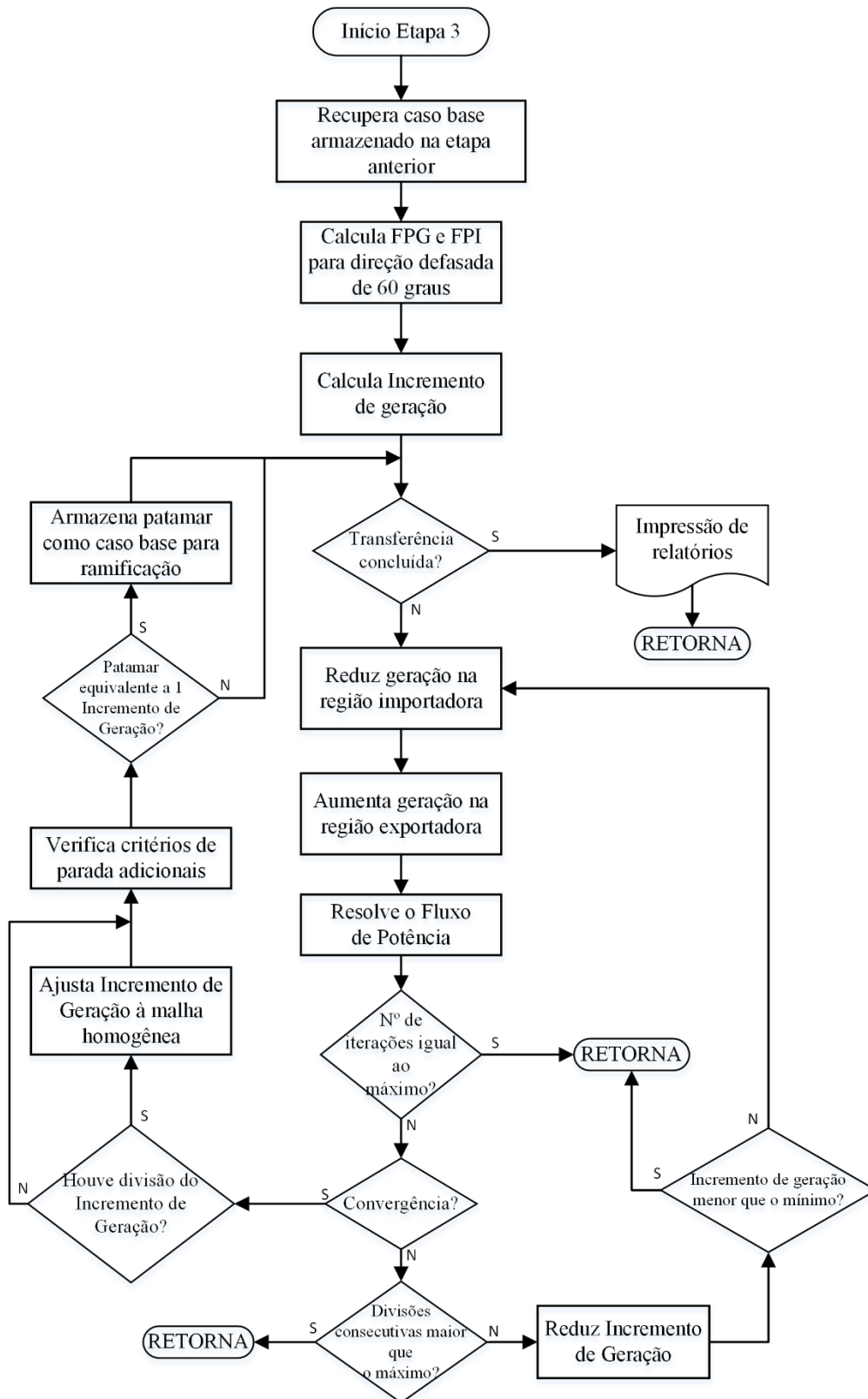


Figura 22 – Fluxograma da Etapa 3

### 3.4.3 – Setor Completo

Após o algoritmo ter percorrido todo o setor a partir da direção base, é obtido um gráfico como o mostrado na Figura 23.

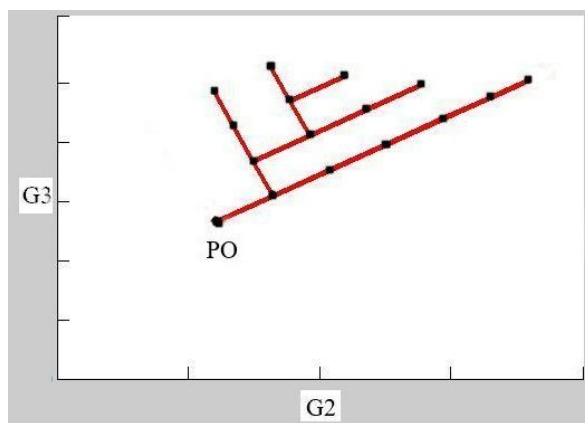


Figura 23 – Gráfico ao Final do Primeiro Setor

Após o algoritmo percorrer todos os seis setores, a malha homogênea de patamares de geração tem a aparência mostrada na Figura 24.

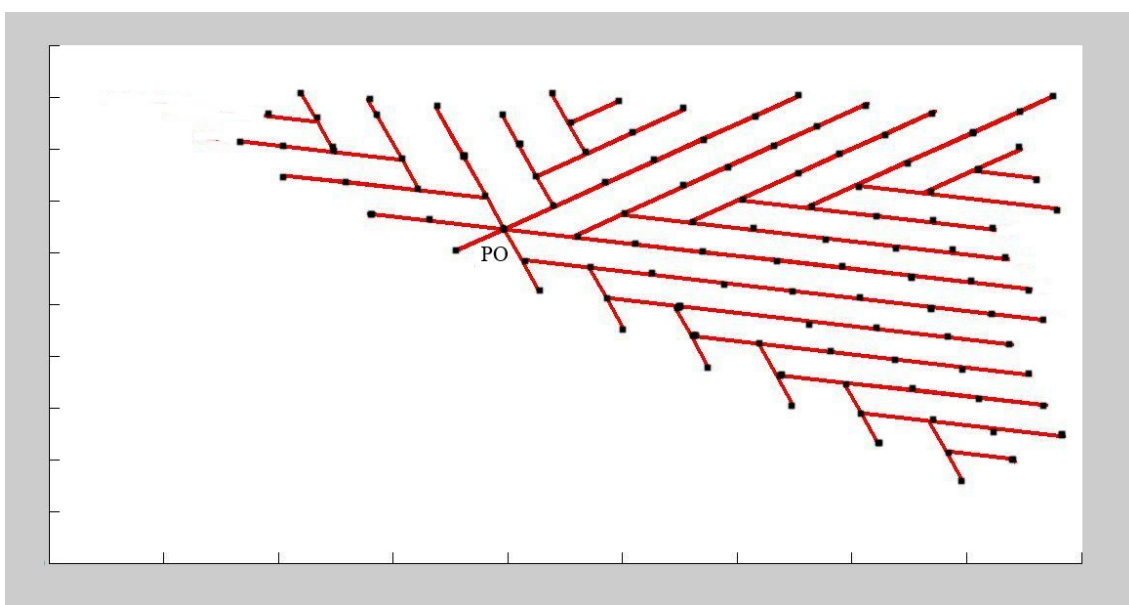


Figura 24 – Malha Homogênea de Patamares de Geração

### 3.5 – CÁLCULO DO INCREMENTO DE GERAÇÃO

Na implementação original da ferramenta VSA do programa ANAREDE, utilizada como base para este trabalho, o passo de geração é calculado como um percentual do montante de geração que se deseja transferir entre as regiões importadora e exportadora (passo de transferência, expresso por uma constante denominada STTR). Este montante de geração a ser transferido também é expresso como um percentual e isso torna o processo dependente do regime de carga. Como consequência, o passo de geração sofre forte influência do carregamento do sistema, tornando imprevisível o esforço computacional necessário para a criação da região de segurança como será mostrado no Capítulo 4.

Na metodologia proposta, o cálculo do passo de geração leva em consideração a dimensão do espaço de busca de soluções viáveis, tornando esse valor independente do carregamento do sistema.

O cálculo do passo de geração é feito a partir da diagonal de uma janela retangular delimitada pelas gerações máxima e mínima dos grupos de geração G2 e G3, que são calculadas levando consideração o despacho atual do sistema. O despacho mínimo para cada grupo de geração é determinado verificando qual a geração de potência ativa mínima necessária para atender à carga do sistema, considerando o máximo despacho dos outros dois grupos. O despacho máximo para cada grupo de geração é determinado de forma que não seja superior à carga do sistema, considerando os dois outros grupos com o despacho mínimo.

Esta forma de calcular o passo de geração produz espaços de busca de soluções viáveis que, dependendo do despacho dos grupos, variam em tamanho e localização no espaço G1xG2xG3. Com base no banco de dados do ANAREDE/ANATEM correspondente ao cenário "ONS – QUADRIMESTRAL – 2014", foram calculados os valores mínimo e máximo de geração dos grupos geradores para os regimes de carga leve, média e pesada, mostrados na Tabela 6. As diagonais que servem para o cálculo do incremento de geração são mostradas na Figura 25. Com base nesses valores foram



produzidos gráficos ilustrando os limites em regime de carga leve, média e pesada, como mostram as Figuras 26, 27 e 28, respectivamente.

Tabela 6 – Valores Mínimos e Máximos de Geração por Grupo em Relação ao Despacho para Determinação dos Espaços de Busca

Limites de Geração Globais					Carga Leve				
Grupo	Máximo (MW)		Mínimo (MW)		Grupo	Ponto de Operação (MW)	Despacho (MW)	Mínimo (MW)	Máximo (MW)
G1	6896		0		G1	2758	8168	0	6896
G2	11092		0		G2	4742		0	8168
G3	2014		0		G3	668		0	2014
Carga Média					Carga Pesada				
Grupo	Ponto de Operação (MW)	Despacho (MW)	Mínimo (MW)	Maximo (MW)	Grupo	Ponto de Operação (MW)	Despacho (MW)	Mínimo (MW)	Máximo (MW)
G1	5516	15708	2602	6896	G1	6553	18716	5610	6896
G2	8757		6798	11092	G2	10251		9806	11092
G3	1435		0	2014	G3	1912		728	2014

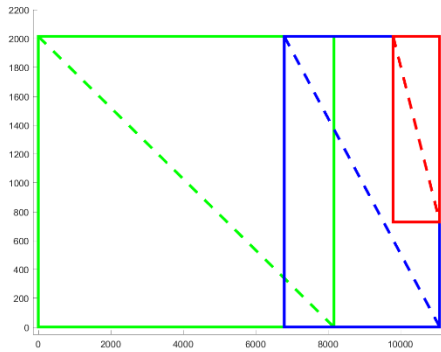


Figura 25 – Diagonais dos Espaços de Busca de Soluções Viáveis

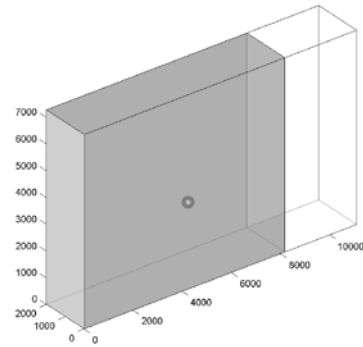


Figura 26 – Espaço de Busca - Carga Leve

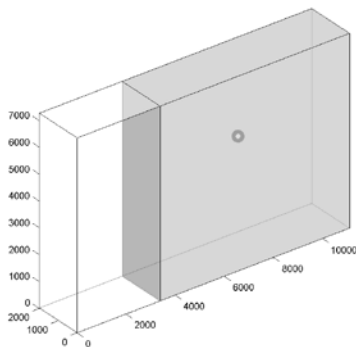


Figura 27 – Espaço de Busca - Carga Média

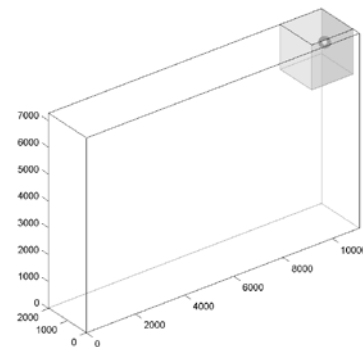


Figura 28 – Espaço de Busca - Carga Pesada

A partir da projeção do espaço de busca no plano  $G2 \times G3$  e de sua diagonal, calcula-se o incremento de geração aplicando o percentual expresso pelo passo de transferência ao valor da diagonal do plano  $G2 \times G3$ . A quantidade total de patamares de geração pode variar em função do aspecto geométrico da projeção em  $G2 \times G3$ . Um formato quadrado produz mais patamares que um formato retangular, no qual existe grande diferença entre as variações de despacho de  $G2$  e  $G3$ . Esta característica pode ser comprovada nos resultados apresentados no Capítulo 4.

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Os resultados apresentados foram obtidos utilizando uma versão modificada do ANAREDE para Linux com a substituição da metodologia original baseada em direções de transferência de geração radiais pela metodologia proposta. Para a validação dos resultados são feitas comparações entre os resultados obtidos utilizando o ANAREDE original e os resultados obtidos com a versão modificada, que utiliza a metodologia proposta. A geração dos nomogramas para o ANAREDE original é feita por um programa denominado ANAVIS, desenvolvido para Linux, que tem como premissa básica a estrutura de solução baseada em direções de transferência de geração radiais. Em função das diferenças de estrutura dos arquivos criados pela versão modificada do ANAREDE, o ANAVIS não pode ser utilizado para gerar os nomogramas para a versão modificada, que implementa a metodologia proposta. Assim, para que fosse possível fazer uma validação comparativa inicial dos resultados para o sistema teste de 9 Barras, um nomograma foi gerado manualmente. Para os demais casos foi utilizado um programa auxiliar que, a partir dos arquivos gerados pelas duas versões do ANAREDE, produz arquivos para o Matlab, os quais dão origem a gráficos interligando os patamares e formando uma grade (mesh) de maneira que seja possível a visualização e a comparação dos resultados obtidos. Como padrão foi adotada a cor AZUL para as grades referentes ao ANAREDE original e a cor VERMELHA para as grades referentes à metodologia proposta.

A comparação dos resultados não é simples, uma vez que existem diversos fatores a serem considerados. Alguns dos parâmetros de configuração relacionados à criação da RSE têm significados distintos nas duas metodologias implementadas no ANAREDE. Com isso são necessários ajustes para que a comparação seja honesta.

### **4.2 ASPECTOS COMPARATIVOS**

As metodologias foram comparadas qualitativa e quantitativamente. As comparações qualitativas dizem respeito à precisão dos resultados numéricos, e enfocam principalmente a comparação das curvas limite geradas pelas duas versões de

metodologia e a cobertura das regiões. As validações quantitativas enfocam o esforço computacional envolvido na avaliação de segurança estática e as consequências da utilização destes resultados em uma posterior fase de avaliação de segurança dinâmica (DSA).

Para possibilitar a comparação entre as soluções, são levados em consideração os seguintes fatores:

- Precisão: Equivalência das curvas limite;
- Cobertura: Área dentro dos limites de geração coberta pela metodologia;
- Quantidade de patamares gerados, e;
- Tempo de execução.

#### 4.2.1 Precisão: Equivalência das Curvas Limite

Esse é o principal fator de validação da metodologia proposta, pois garante que a avaliação de segurança é equivalente àquela realizada pelo método baseado em direções de transferência de geração radiais.

#### 4.2.2 Cobertura: Área Dentro dos Limites de Geração Coberta pela Metodologia

A cobertura do espaço de busca de soluções viáveis é definida pela precisão da curva limite de geração. De acordo com o estudo realizado por (ALMEIDA 2011), esta precisão está diretamente ligada à quantidade de pontos de operação gerados durante a avaliação da RSE. No ANAREDE original essa quantidade é definida pelo número de direções especificado pelo usuário. Na metodologia proposta o parâmetro de número de direções não é utilizado. No seu lugar, o passo de transferência de geração de potência ativa é que determina a precisão da metodologia.

#### 4.2.3 Quantidade de Patamares Gerados

A quantidade de patamares gerados tem impacto direto no esforço computacional. A cada patamar de geração corresponde um ponto de operação que será objeto de

avaliação de segurança dinâmica em um processo mais amplo de avaliação de segurança estática e dinâmica. É necessário ter em mente que a avaliação de segurança dinâmica tem um custo computacional muito maior que o da avaliação de segurança estática. Do ponto de vista de esforço computacional, a quantidade de patamares é a principal medida de comparação. A comparação entre as metodologias será feita de forma aproximada pois a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre regiões gera patamares adicionais na busca pelos pontos extremos das curvas limite.

#### 4.2.4 Tempo de Execução

Da mesma forma que a quantidade de patamares, o tempo de execução também é afetado pela ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência entre regiões, pois esse tempo é determinado pelo número de soluções do problema de fluxo de potência necessário para a avaliação dos pontos de operação gerados durante a criação da RSE. Entretanto a relação entre tempo de execução e quantidade de patamares não é direta, pois algumas variações podem ser verificadas devido à não convergência do fluxo de potência, assim como pela ocorrência de violações dos limites pré-estabelecidos. Isto faz com que, nesses casos, sejam necessários solucionar vários fluxos de potência para a geração de apenas um patamar.

Como aspecto comparativo, o tempo de execução não deve ser considerado isoladamente, mas em conjunto a cobertura do espaço de soluções e a quantidade de patamares necessários para que se obtenha uma RSE confiável. Há ainda que se considerar que apenas testes com execução serial foram realizados. O ANAREDE original possui capacidade de paralelização, com a geração de um processo para cada direção de transferência de geração. O ANAREDE modificado pela metodologia proposta herdou essa capacidade, ainda que limitado a seis direções base. Entretanto, existe um grande potencial a ser explorado com a paralelização das ramificações dessas direções.

### 4.3 METODOLOGIA DE TESTES

Em sua configuração *default* o ANAREDE utiliza 20 direções, número considerado por (ALMEIDA 2011) como insuficiente para a obtenção de resultados

precisos. Ainda segundo a mesma referência, a partir de 50 direções uma precisão aceitável já seria alcançada. No entanto, é importante ressaltar que esses resultados foram obtidos com apenas um caso teste. Nos testes realizados para a produção dos resultados desse trabalho, foram utilizadas 40 direções para que seja possível observar com facilidade a melhoria na precisão, uma vez que as 20 direções da configuração *default* coincidirão com 20 das 40 direções, produzindo uma melhoria na precisão e na cobertura do espaço de soluções viáveis.

Como dito anteriormente, a comparação dos resultados não é simples, e requer ajustes para que a comparação seja honesta. A avaliação dos resultados se baseia em comparações a partir de dois tipos de dados: passo de transferência de geração, que sendo um valor percentual receberá a denominação de equivalência percentual, e incremento de geração calculado, que por ser medido em MW, receberá a denominação de equivalência numérica.

- Equivalência percentual: utilização direta do passo de transferência de geração *default* de 5% do ANAREDE. Esta abordagem produz resultados mais discrepantes e é utilizada para demonstrar as deficiências do modelo de incremento de geração baseado em direções de transferência de geração radiais.

- Equivalência numérica: baseada na utilização de um mesmo valor do incremento de geração para as duas metodologias. O valor de referência adotado é o incremento de geração calculado pelo ANAREDE, que utiliza a metodologia proposta para um passo de transferência de 5%. Para que esse mesmo valor seja utilizado pelo ANAREDE original, é necessário calcular manualmente um passo de transferência de geração que reproduza o mesmo valor de incremento de geração. Essa abordagem produz resultados relevantes para a análise comparativa das soluções.

Para realização dos testes, o ANAREDE original e o ANAREDE com a implementação da metodologia proposta foram configurados para realizar uma estratégia de bisseção na busca dos limites da RSE.

O Apêndice A contém tabelas comparativas com os resultados de execuções para diversos valores do passo de transferência de geração.

#### 4.4 SISTEMA 9 BARRAS

O primeiro sistema selecionado para testes foi o sistema tutorial de pequeno porte apresentado por (ANDERSON e FOUAD 1977), cujo diagrama unifilar é exibido na Figura 29.

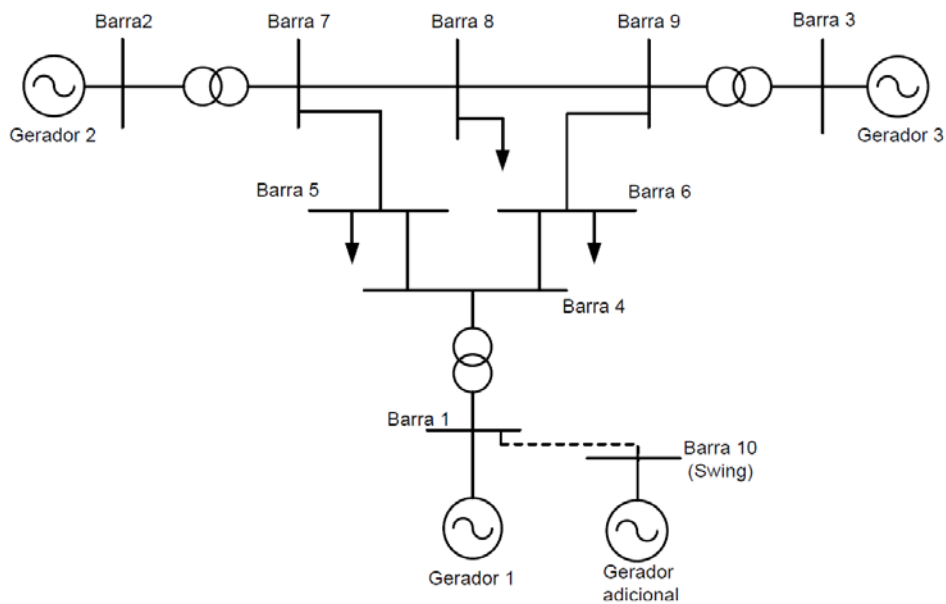


Figura 29 – Topologia do Sistema de 9 Barras

Trata-se de um sistema composto originalmente por 9 barras, das quais três são do tipo PV (barras 1, 2 e 3) e seis do tipo PQ (barras de 4 a 9). A este sistema foi acrescentada uma barra *swing* fictícia (barra 10). Os motivos para inclusão desta barra são descritos em (ALMEIDA 2011).

Cada barra de geração é conectada a apenas uma unidade geradora, de acordo com a Tabela 7, que também destaca a potência máxima em MVA e a tensão de geração de cada máquina.

Tabela 7 – Geradores do Sistema 9 Barras

Barra	Gerador Conectado	Potência (MVA)	Base de Tensão (kV)
1	Gerador 1	1 x 247,5	16,5
2	Gerador 2	1 x 192,0	18,0
3	Gerador 3	1 x 128,0	13,8

#### 4.4.1 RSE do Sistema 9 barras – Equivalência Percentual

Os passos de transferência de geração, os incrementos de geração correspondentes, tempos de execução e as quantidades de patamares, para 20 e 40 direções, utilizando a versão original do ANAREDE e a metodologia proposta são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do Sistema 9 Barras – Equivalência Percentual

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	5	7,05	2	223
ANAREDE 40 Direções	5	7,05	3,9	448
Metodologia Proposta	5	9,81	2,8	224

É possível perceber uma proximidade de resultados entre o ANAREDE e a metodologia proposta quando se adota o número de direções *default* (20). Neste caso existe um custo computacional considerável quando a precisão é melhorada através da adoção de um número maior de direções.

As grades geradas pelo Matlab que demonstram a distribuição dos patamares podem ser observadas nas Figuras 30, 31 e 32.



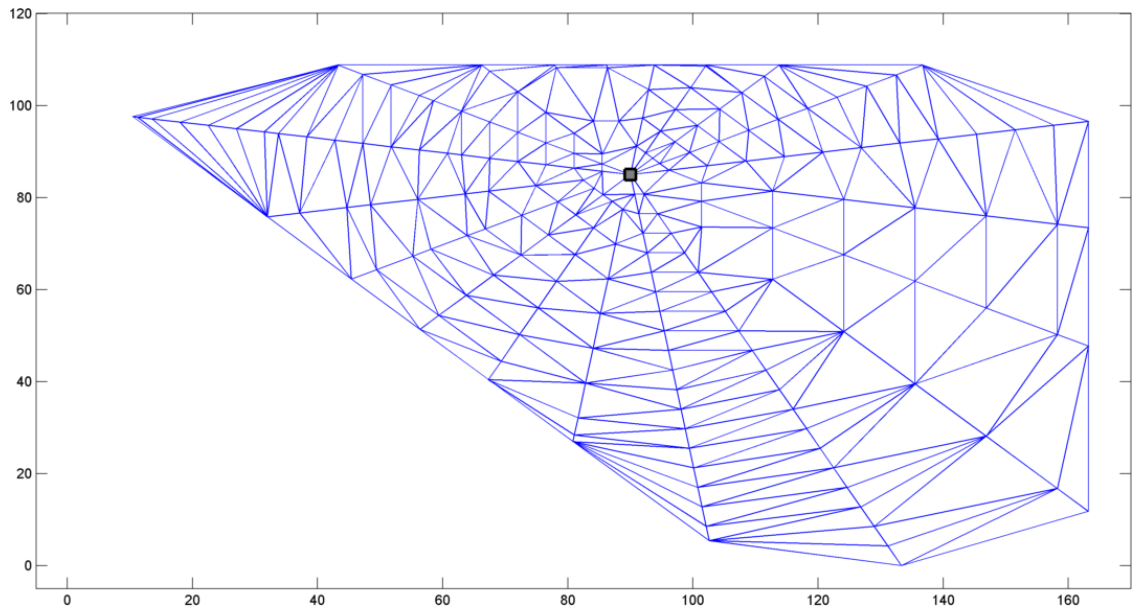


Figura 30 – Sistema 9 Barras – Grade 20 Direções - Equivalência Percentual

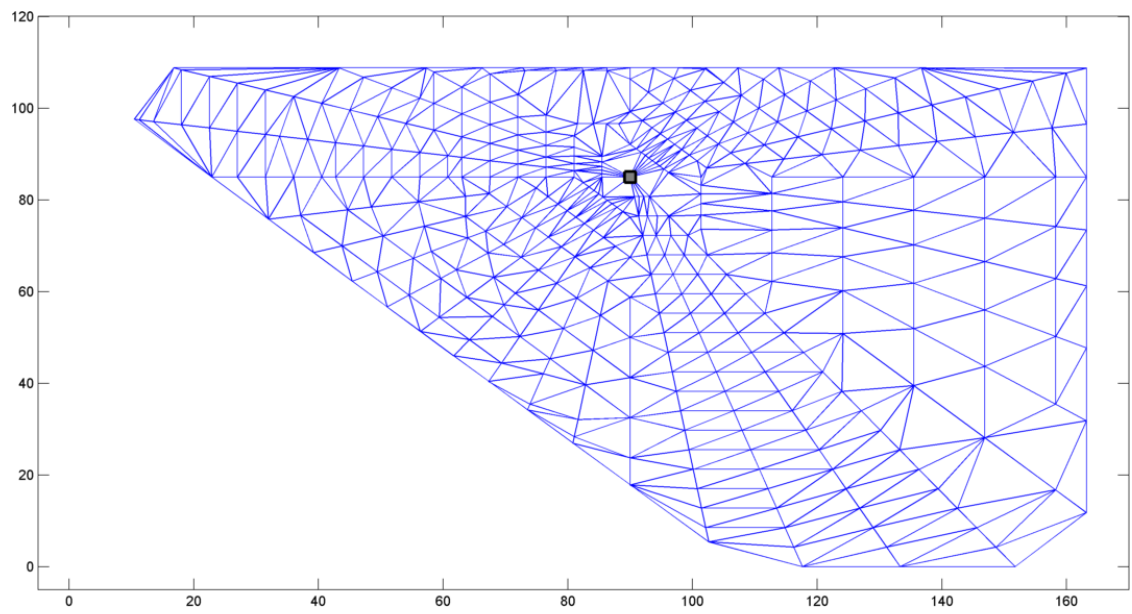


Figura 31 – Sistema 9 Barras – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual

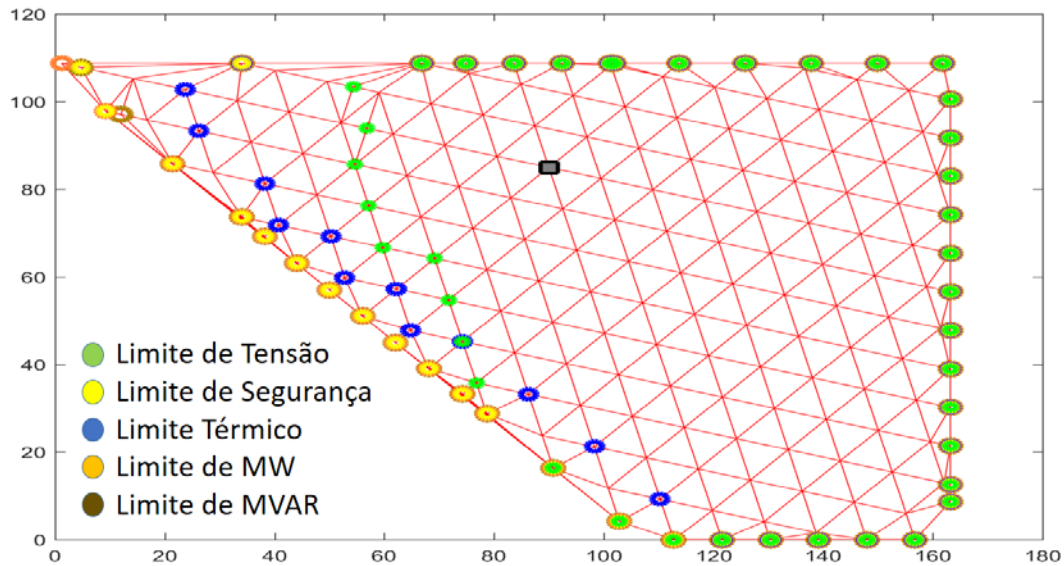


Figura 32 – Grade Gerada pela Metodologia Proposta

É possível notar uma significativa diferença na área e na forma das grades geradas em cada caso. As grades geradas pelo ANAREDE original produzem uma grande irregularidade na distribuição dos patamares, com uma elevada densidade próximo ao ponto de operação inicial e uma densidade decrescente à medida que os patamares se afastam do mesmo.

No caso da grade gerada pela metodologia proposta, é possível notar a homogeneidade da distribuição dos patamares. Também é possível notar que esta homogeneidade foi obtida com um aumento percentual de 40% no tempo de execução em relação ao ANAREDE com 20 direções. Isto se deve ao maior número de fluxos de potência calculados na obtenção dos limites. A metodologia proposta promove uma maior cobertura do espaço de busca de soluções viáveis, mesmo considerando o caso com 40 direções, o que pode ser verificado pela comparação das Figuras 33 e 34. Este aspecto será discutido mais adiante.

#### 4.4.2 RSE do Sistema 9 barras – Equivalência Numérica

Os passos de transferência de geração, os incrementos de geração correspondentes, tempos de execução e as quantidades de patamares, para 20 e 40

direções utilizando a versão original do ANAREDE e a metodologia proposta são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados do Sistema 9 Barras – Equivalência Numérica

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	6,96	9,81	1,8	166
ANAREDE 40 Direções	6,96	9,81	3,2	337
Metodologia Proposta	5	9,81	2,8	224

Utilizando passos de transferência de geração que resultam no mesmo valor de incremento de geração, os resultados obtidos pela metodologia proposta se situam entre os resultados do ANAREDE no que se refere ao número de patamares gerados. Neste caso existe um aumento considerável do custo computacional quando a precisão é melhorada através da adoção de um número maior de direções de transferência de geração.

As grades geradas pelo Matlab, que mostram a distribuição dos patamares em cada caso do ANAREDE podem ser observadas nas Figuras 33 e 34.

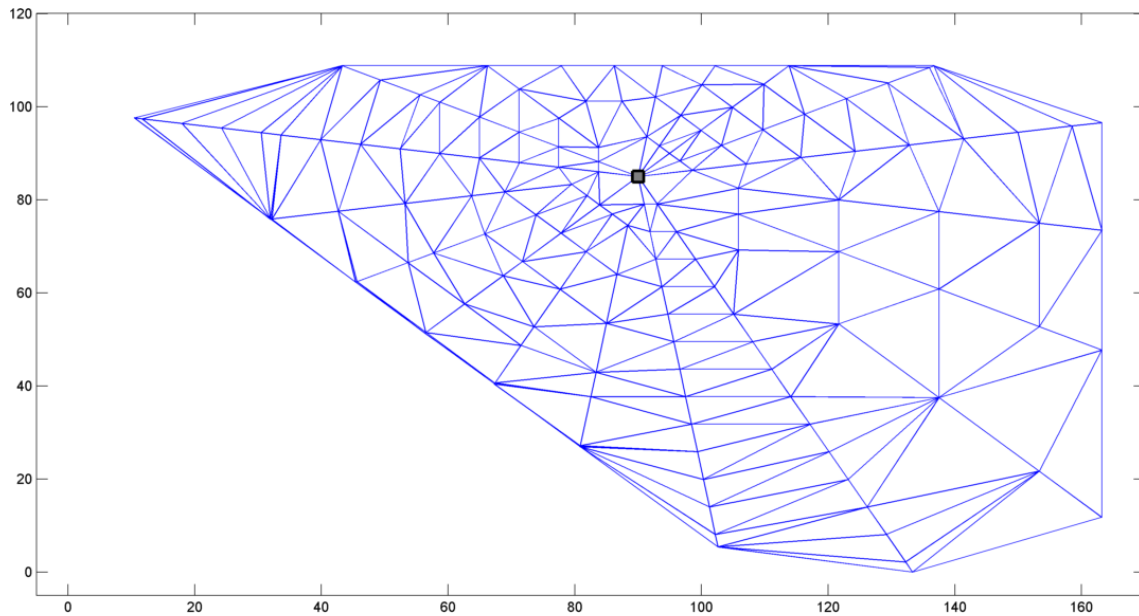


Figura 33 – Sistema 9 Barras – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica

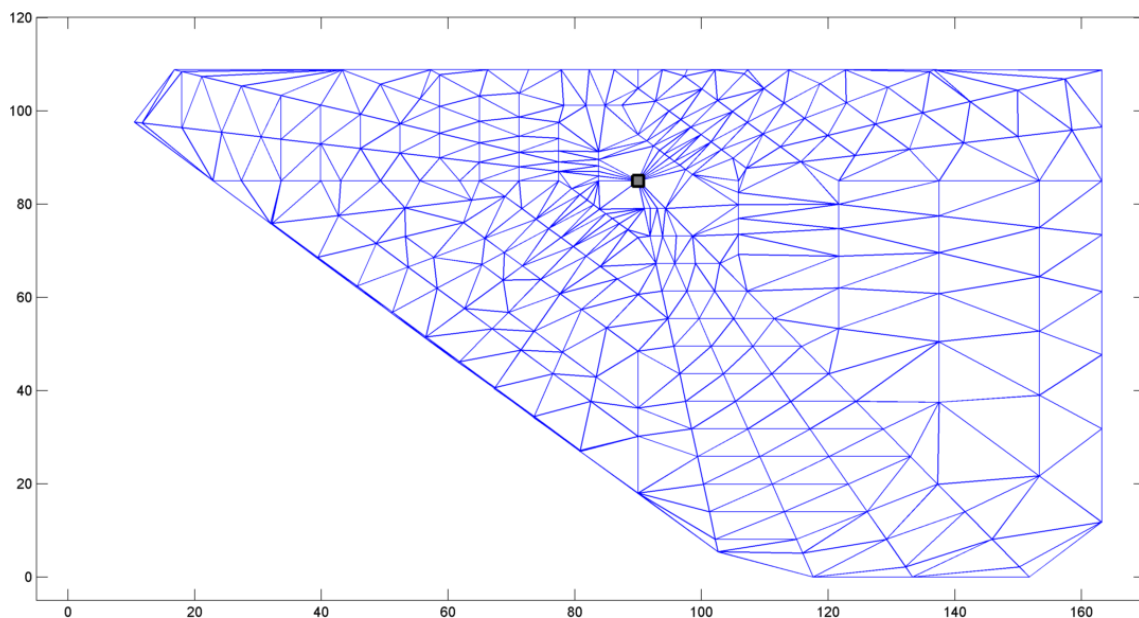


Figura 34 – Sistema 9 Barras – Grade 40 Direções - Equivalência Numérica

De forma análoga ao que foi verificado quando se utilizou a equivalência percentual dos passos de transferência, é possível notar uma sensível diferença de resultados entre a versão original do ANAREDE e a versão que utiliza a metodologia proposta, mostrada na Figura 32. As grades geradas pelo ANAREDE original apresentam uma grande irregularidade na distribuição dos patamares, com uma elevada densidade destes próximo do ponto de operação inicial, com esta densidade diminuindo à medida

que se aproximam dos limites do espaço de busca de soluções viáveis. Apesar das diferenças no número de patamares gerados, o aspecto visual da RSE não se altera significativamente. Isso se deve à proximidade dos valores de incrementos de geração utilizados.

#### 4.4.3 RSE do Sistema 9 barras – Avaliação da Cobertura

Sobrepondo a grade gerada pelo ANAREDE original à curva de limite de geração obtida pela metodologia proposta, podemos comparar a cobertura promovida pelas duas abordagens. Na configuração *default* de 20 direções existe uma clara deficiência na cobertura, com um melhor resultado apresentado pela metodologia proposta como mostra envoltória em vermelho a Figura 35. Na configuração de 40 direções o resultado em relação à cobertura se aproxima, mas ainda é possível notar uma pequena vantagem da metodologia proposta no canto superior esquerdo, como mostra a Figura 36.

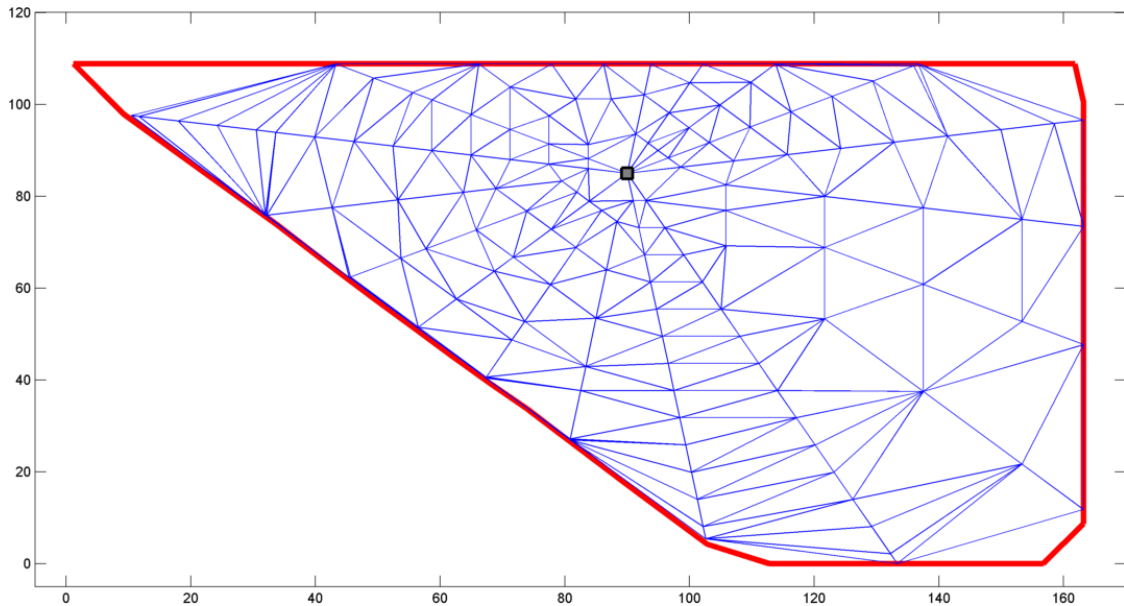


Figura 35 – Sobreposição das Grades – 20 Direções

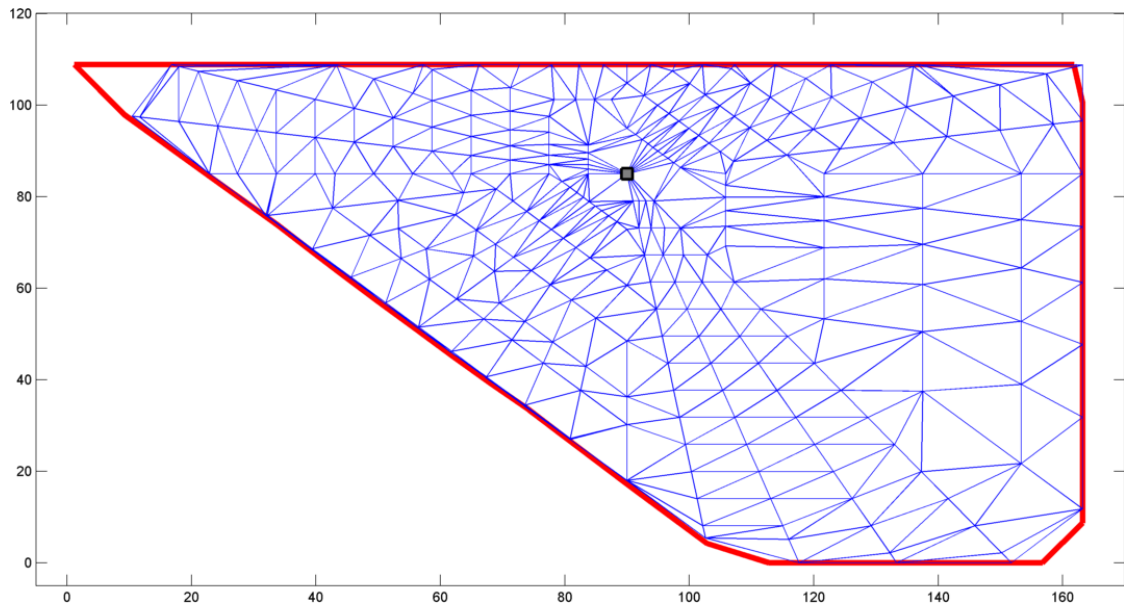


Figura 36 – Sobreposição das Grades – 40 Direções

#### 4.4.4 Nomograma da RSE do Sistema 9 Barras

Conforme dito anteriormente, especificamente para esse caso foram gerados nomogramas a fim de que seja possível validar a metodologia proposta qualitativamente. Os nomogramas gerados pelo ANAREDE original podem ser vistos nas Figuras 37 e 38 e o nomograma gerado pela metodologia proposta pode ser visto na Figura 39.

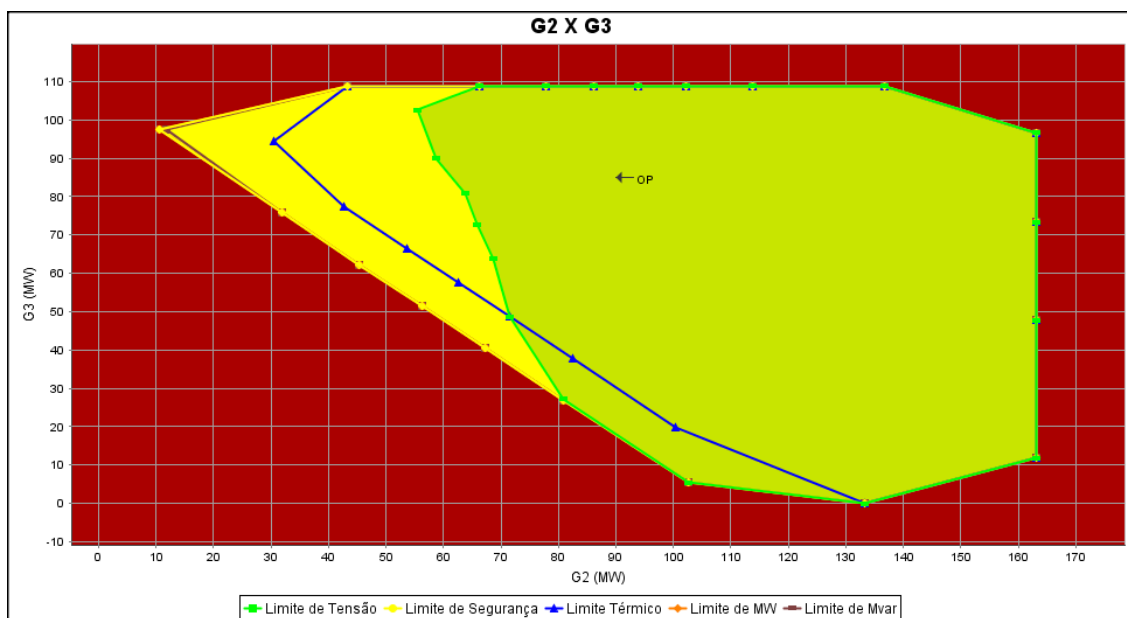


Figura 37 – Nomograma Gerado pelo ANAREDE Original – 20 direções

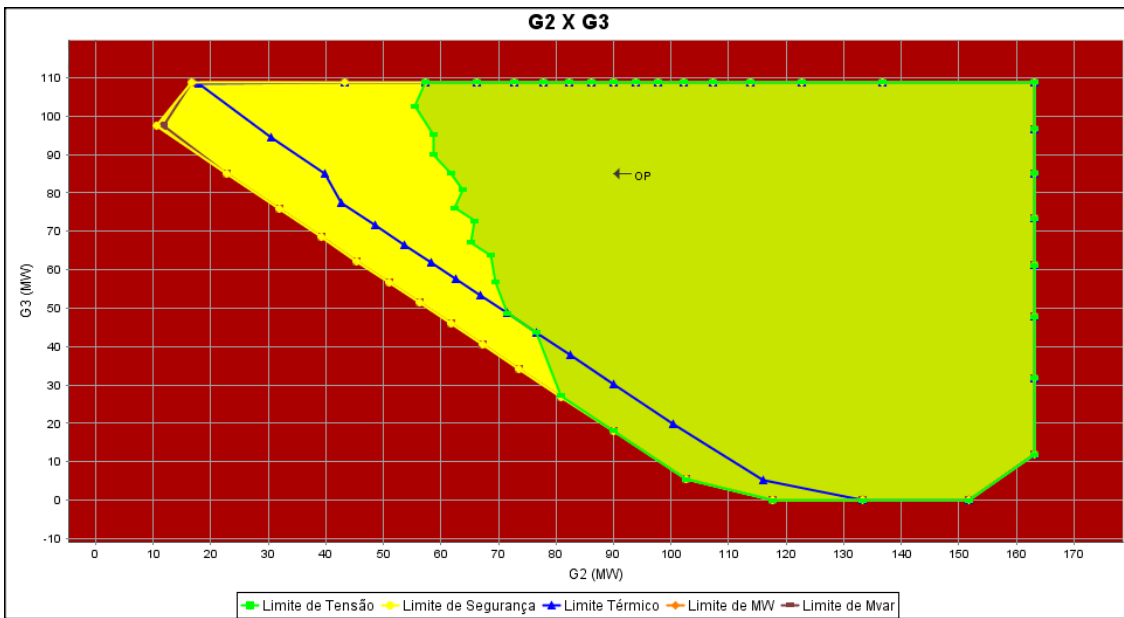


Figura 38 – Nomograma Gerado pelo ANAREDE Original – 40 direções

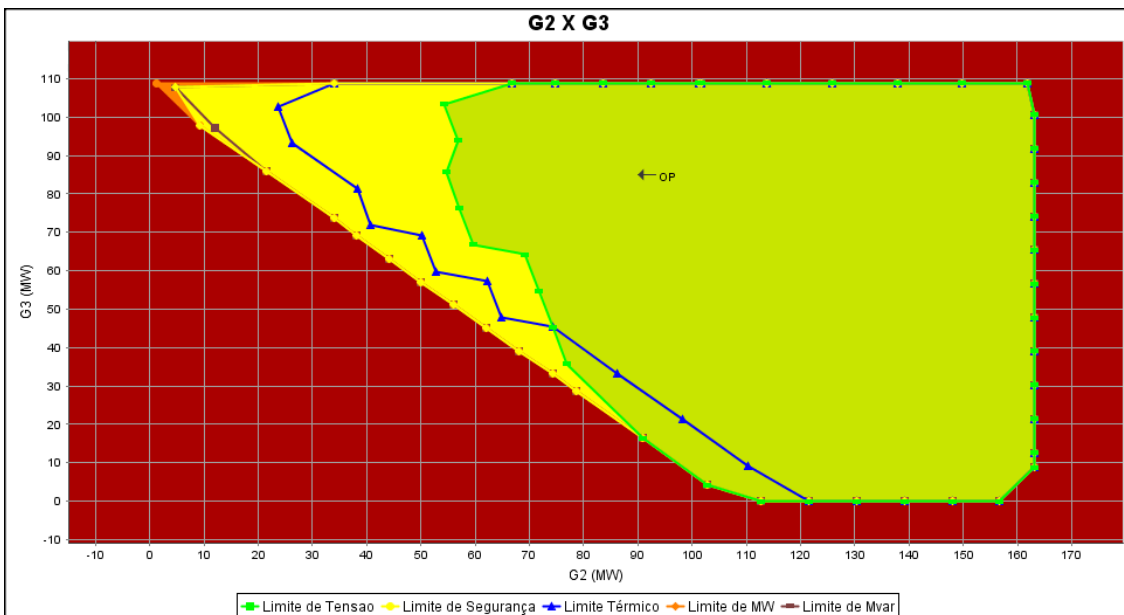


Figura 39 – Nomograma Gerado pela Metodologia Proposta

É possível notar que a metodologia proposta produz resultados equivalentes àqueles gerados pelo ANAREDE original, validando o aspecto qualitativo. As aparentes imperfeições (linha serrilhadas) visualizadas no nomograma gerado a partir da metodologia proposta (Figura 41) são inerentes a distribuição triangular dos patamares e

em parte à inabilidade do programa ANAVIS de lidar com a estrutura de arquivos necessária à implementação das direções ramificadas, conforme dito anteriormente.

#### 4.5 SISTEMA BRASILEIRO – ONS – DEZEMBRO/2011

Para exemplificar o funcionamento da metodologia proposta em um caso real, foi utilizada uma configuração do Sistema Interligado Nacional de Dezembro de 2011. O sistema é composto por 4666 barras, 698 grupos de geradores, os elos de corrente contínua de Itaipu e Garabi, 16 compensadores estáticos, 4 compensadores série controlados, etc.

Foram determinadas as regiões de segurança estática considerando os mesmos grupos de geração G1, G2 e G3 utilizados em (QUADROS, 2008) em uma configuração mais recente do SIN.

As contingências consideradas na avaliação de segurança estática estão listadas na Tabela 10. Os grupos de geração são apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 – Contingências Programadas

Contingência	Descrição	DE	PARA	Circ
1	LT 500kV Emborcacao - São Gotardo	320	390	1
2	LT 500kV Jaguará – Bom Despacho	325	4050	1 e 2
3	LT 500kV Neves – Vespasiano	349	4028	1
4	LT 500kV Ouro Preto – São Gonçalo	384	378	1
5	LT 345kV Jaguará – Pimenta	326	367	1 e 2



Tabela 11 – Grupos de Geração – G1, G2 e G3

Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
CAMARG/ITUTINGA	IGARAPAVA	EMBORCACAO	CAPIM BRANCO	GUILMAN-AMORIM	AIMORES
FUNIL-GRANDE	VOLTA GRANDE	ITUMBIARA	SERRA DO FACA O	SA CARVALHO	IRAPE
FURNAS	PORTO COLOMBIA	C.DOURADA	CORUMBA I	S.GRANDE	RETIRO BAIXO
MASC. DE MORAES	MARIMBONDO	SAO SIMAO	CORUMBA IV	P.ESTRELA	QUEIMADO
LCBARRETO	AGUA VERMELHA	NOVA PONTE	CORUMBA III	CANDONGA	TRES MARIAS
JAGUARA		MIRANDA	CACU	BAGUARI	

#### 4.5.1 RSE do SIN – Equivalência Percentual

Os passos de transferência de geração adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares e o número de pontos da curva limite de geração são apresentados na a Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do SIN – Equivalência Percentual

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	5	328	56	91
ANAREDE 40 Direções	5	328	115	182
Metodologia Proposta	5	252	108	197

As grades geradas pelo Matlab que demonstram a distribuição dos patamares podem ser observadas nas Figuras 40, 41 e 42.

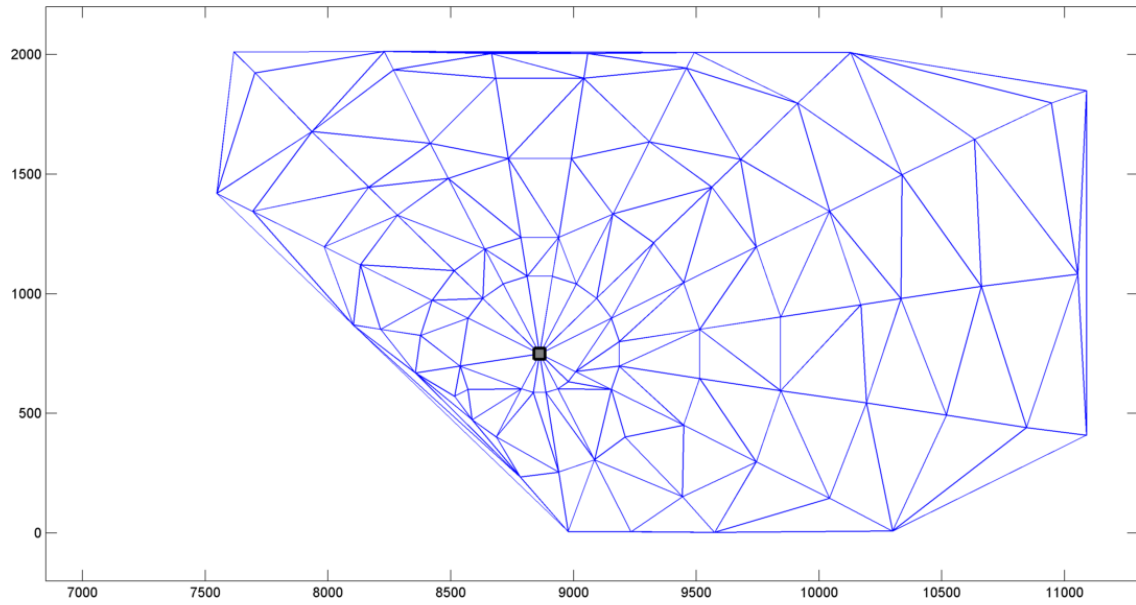


Figura 40 – SIN – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual

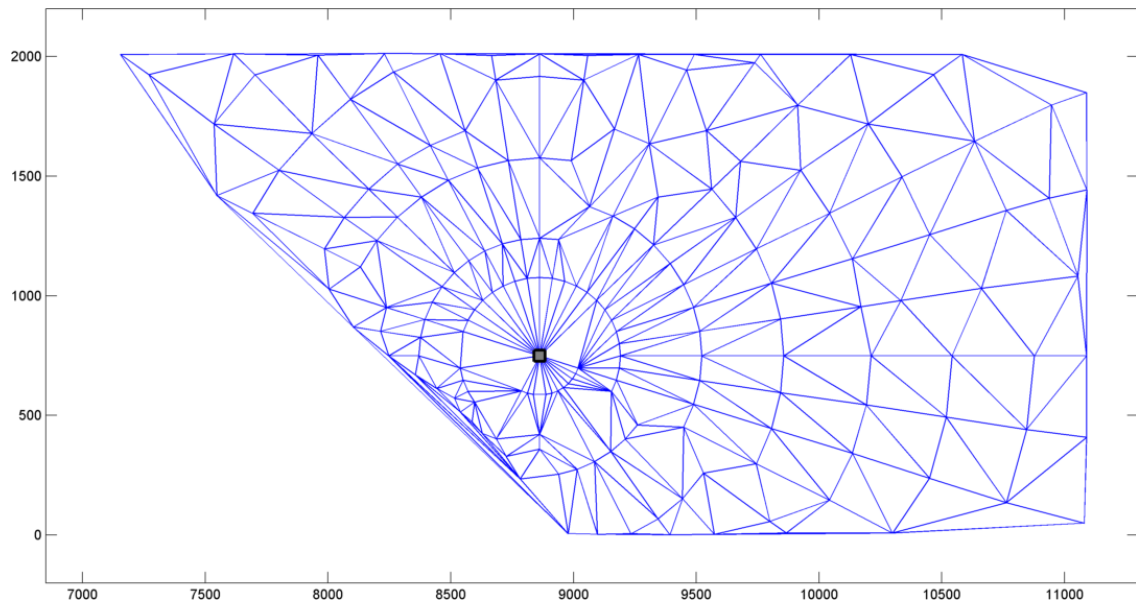


Figura 41 – SIN – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual

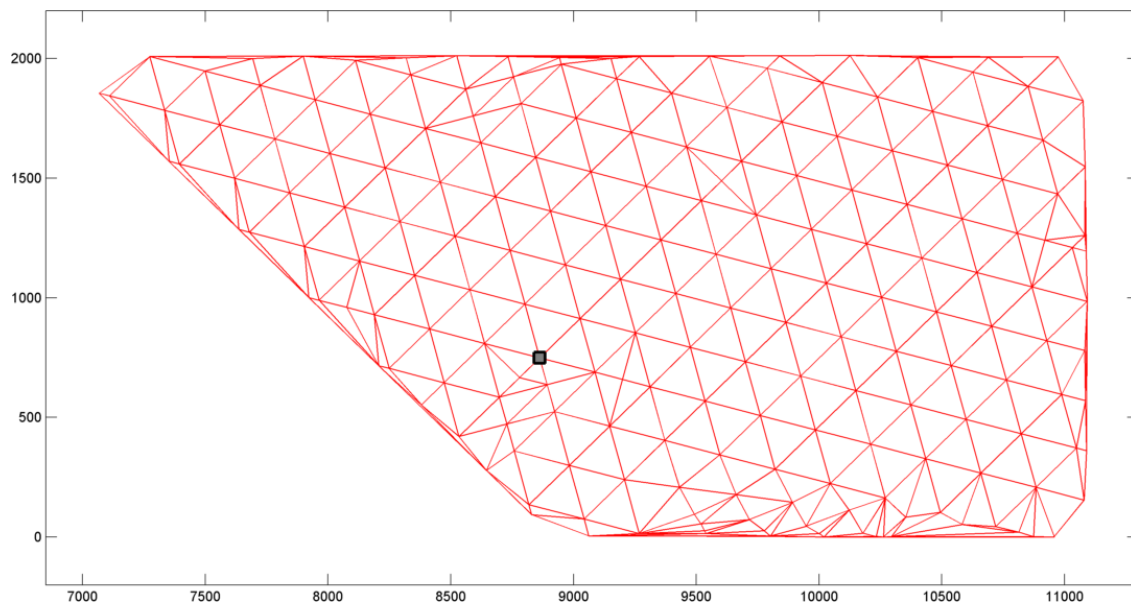


Figura 42 – SIN – Grade Gerada pela Metodologia Proposta

A exemplo do que foi observado para o sistema de 9 barras, a grade gerada pelo ANAREDE original, tanto para 20 quanto para 40 direções, apresenta irregularidade na distribuição dos patamares, com uma elevada densidade próximo do ponto de operação inicial e densidade decrescente à medida que aumenta a distância em relação ao mesmo.

#### 4.5.2 RSE do SIN – Equivalência Numérica

Os passos de transferência de geração adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares e o número de pontos da curva limite de geração para cada caso são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do SIN – Equivalência Numérica

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	3,84	252	68	107
ANAREDE 40 Direções	3,84	252	137	220
Metodologia Proposta	5	252	108	197

As grades geradas pelo Matlab que demonstram a distribuição dos patamares podem ser observadas nas Figuras 43 e 44.

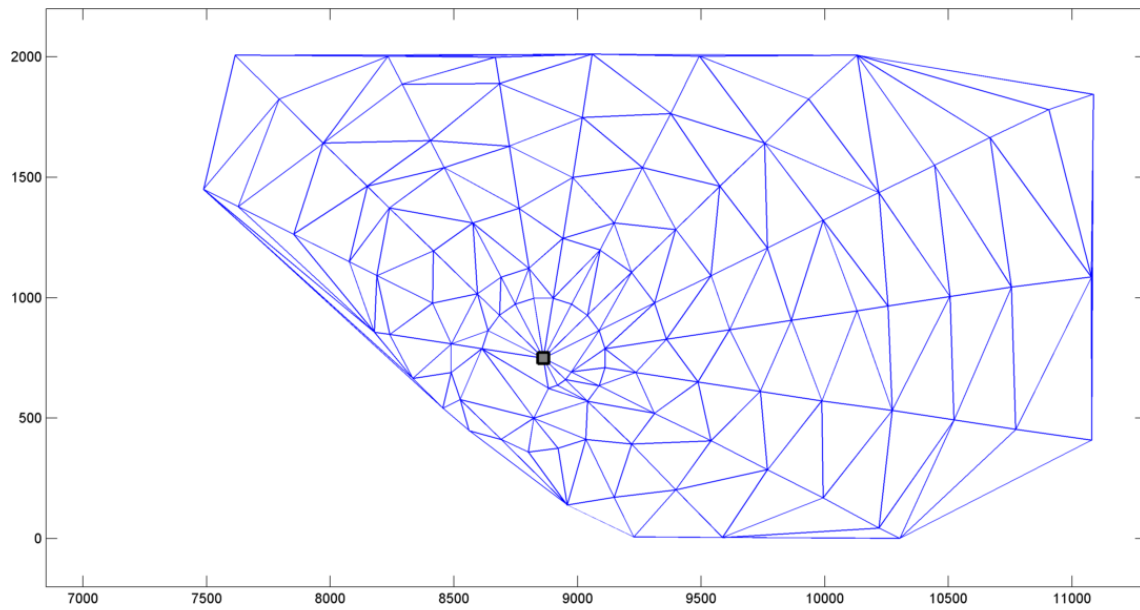


Figura 43 – SIN – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica

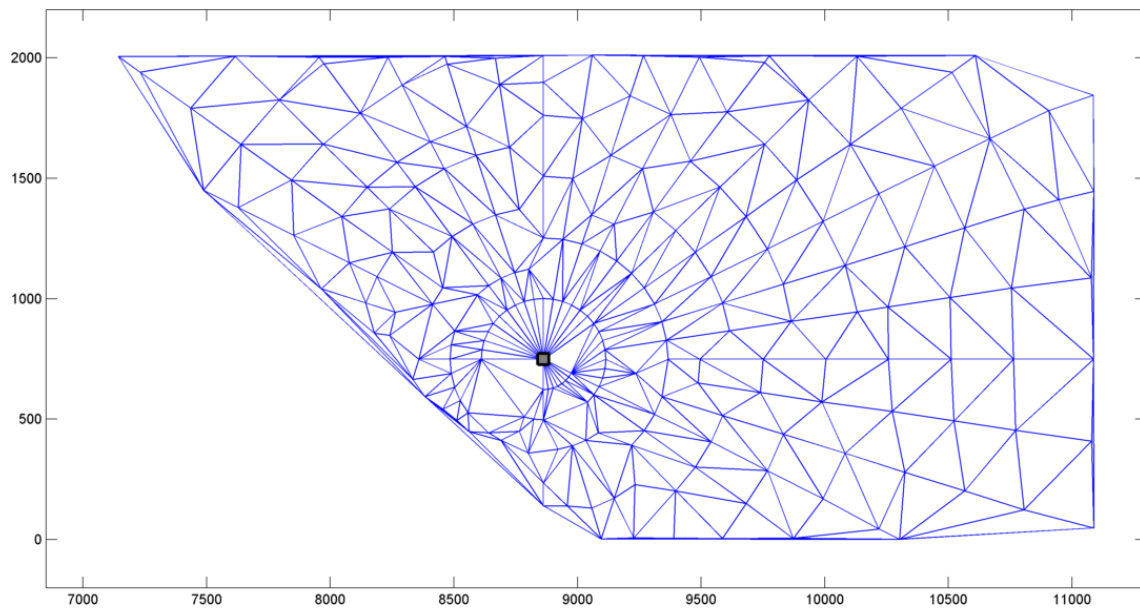


Figura 44 – SIN – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica

De forma análoga ao que foi verificado quando se utilizou a equivalência percentual dos passos de transferência, é possível notar uma sensível diferença de resultados entre a versão original do ANAREDE e a versão que utiliza a metodologia proposta, mostrada da Figura 42. As grades geradas pelo ANAREDE original apresentam uma grande irregularidade na distribuição dos patamares, com uma densidade destes próximo do ponto de operação inicial ainda maior que a verificada na equivalência percentual devido ao menor incremento de geração na equivalência numérica. A densidade de patamares diminui à medida que se aproximam dos limites do espaço de busca de soluções viáveis. Apesar das diferenças no número de patamares gerados, o aspecto visual da RSE não se altera significativamente. Isso se deve à proximidade dos valores de incrementos de geração utilizados.

#### 4.5.3 RSE do SIN – Avaliação da Cobertura

Sobrepondo as grades geradas é possível comparar a cobertura proporcionadas pelas duas metodologias. Neste caso não houve diferença entre a grade gerada pela metodologia proposta e aquela gerada pelo ANAREDE original utilizando 40 direções. Em relação à execução com 20 direções, são observadas diferenças nas extremidades das grades, como mostrado nas Figuras 45 e 46.

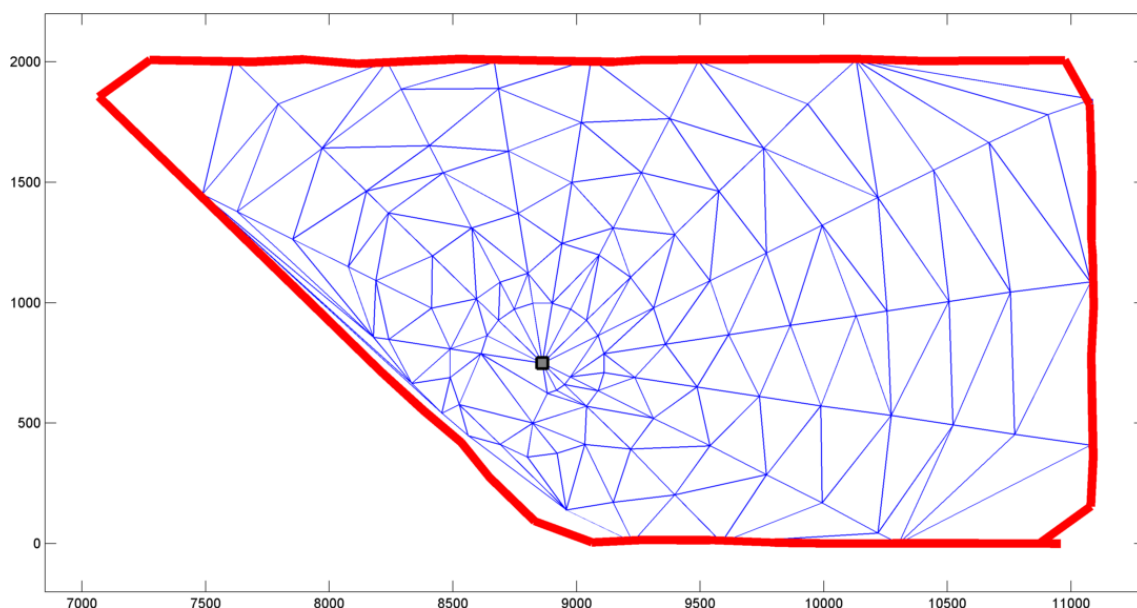


Figura 45 – Sobreposição das Grades – 20 Direções

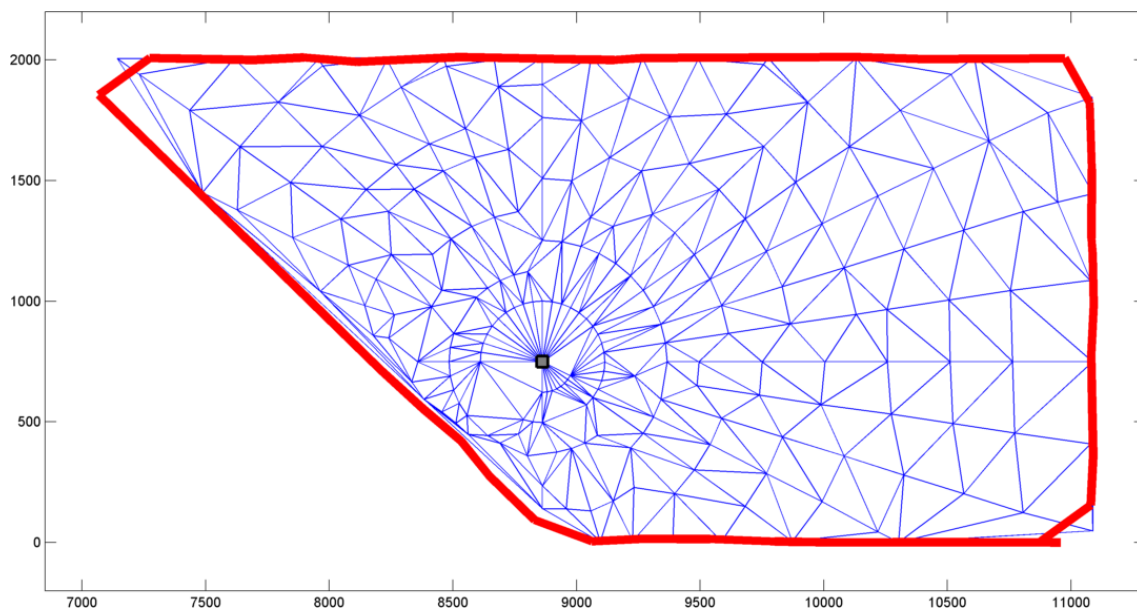


Figura 46 – Sobreposição das Grades – 40 Direções

#### 4.6 SISTEMA BRASILEIRO – ONS – 2014 – COMPARAÇÃO POR REGIME DE CARGA

Para o estudo da relação entre o aspecto e dimensão da RSE e o regime de carga do SEP, foi utilizada uma configuração real do Sistema Interligado Nacional. Foi utilizado o banco de dados do ANAREDE/ANATEM de Planejamento da Operação Elétrica Quadrimestral referente a Fevereiro 2014.

Em (ALMEIDA 2011) é feito um estudo sobre alterações na carga total do sistema, demonstrando que, em função destas alterações, ocorrem modificações dos limites de geração do sistema.

Esta comparação se faz necessária, pois a diferença fundamental entre a metodologia de construção da RSE baseada em direções de transferência de geração radiais e a metodologia proposta reside justamente no cálculo do incremento de geração. O ANAREDE original se baseia no despacho de geração de potência ativa no ponto de

operação inicial, enquanto a metodologia proposta se baseia nos limites mínimo e máximo de geração de potência ativa dos grupos de geração e no carregamento do SEP, também no ponto de operação inicial. É uma diferença sutil, mas importante. O objetivo é mostrar que a metodologia proposta é capaz de calcular automaticamente o incremento de geração adequado, de forma que sua utilização em um ambiente de tempo real se torna independente da ação do usuário. No caso da metodologia original, baseada em um incremento de geração dependente do regime de carga do sistema, o ideal seria conhecer antecipadamente o regime de carga antes de iniciar a construção da RSE, o que não é viável em um ambiente de tempo real.

#### 4.6.1 RSE com Carga Leve – Equivalência Percentual

Nesta configuração o incremento de geração calculado pelo ANAREDE original é muito pequeno em relação ao incremento utilizado pela metodologia proposta. Com isso um número excessivo de passos é necessário para que a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência percorra uma direção de transferência de geração até alcançar o limite de geração. O número de patamares de geração é excessivo mesmo com o *default* de 20 direções. Os passos de transferência adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares e o número de pontos da curva limite de geração são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados Carga Leve Equivalência Percentual

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	5	137,9	94	267
ANAREDE 40 Direções	5	137,9	186	536
Metodologia Proposta	5	420	57	110

As grades geradas pelo Matlab que demonstram a distribuição dos patamares podem ser observadas nas Figuras 47, 48 e 49.

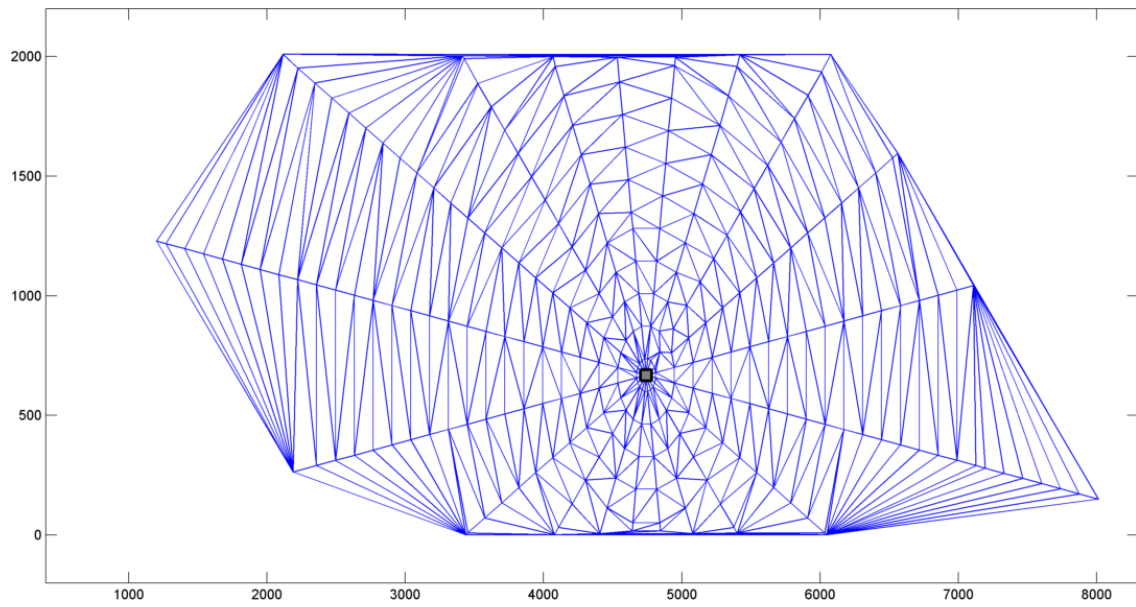


Figura 47 – Carga Leve – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual

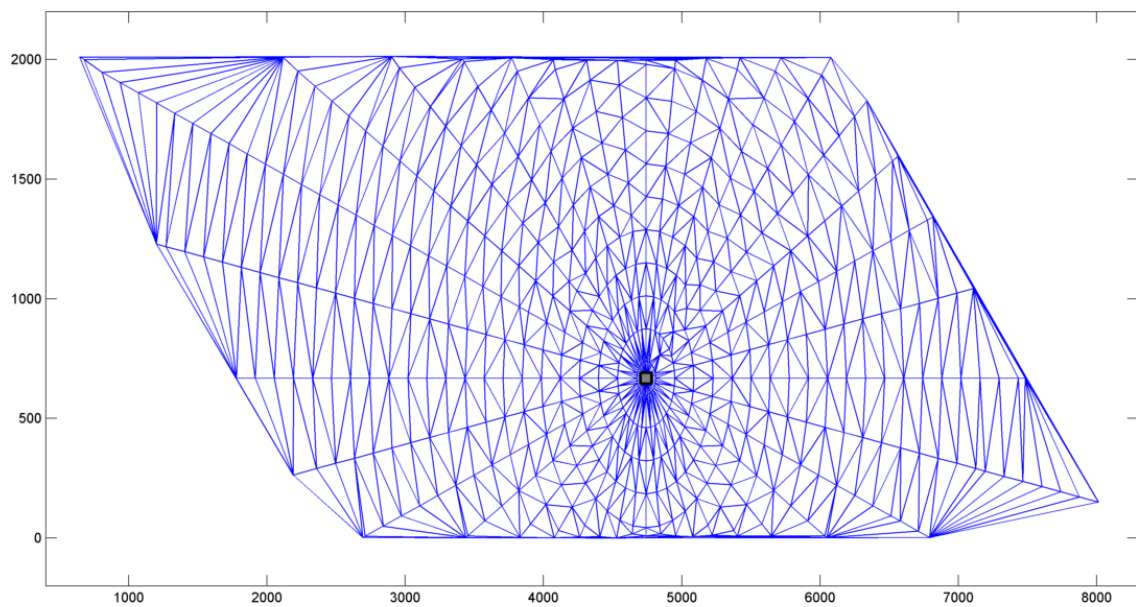


Figura 48 – Carga Leve – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual



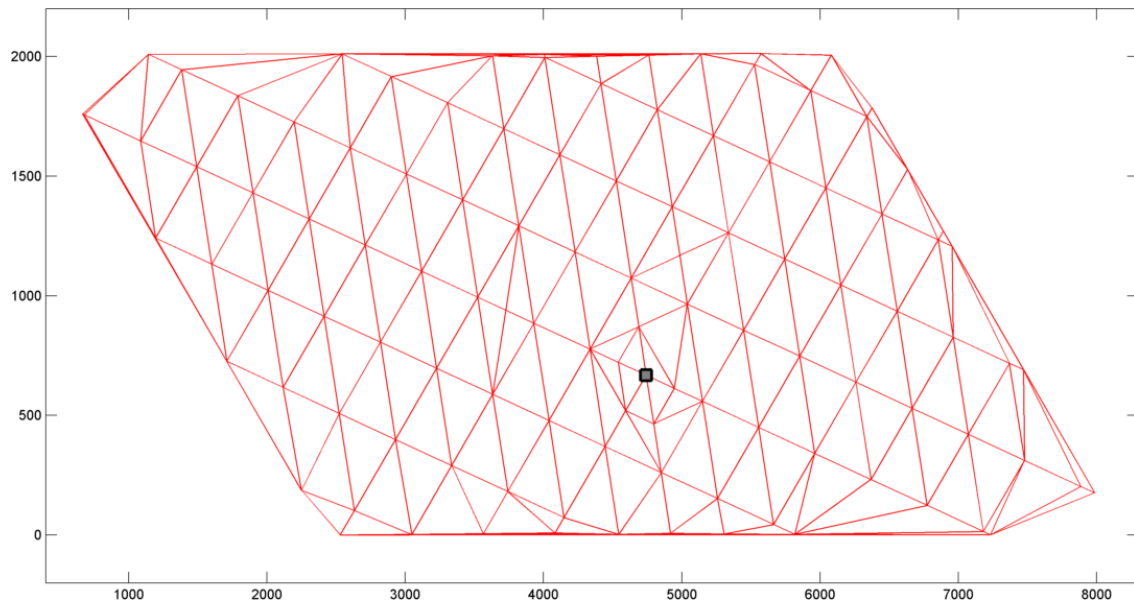


Figura 49 – Carga Leve – Grade Gerada pela Metodologia Proposta

É possível notar uma significativa diferença de resultados. As grades geradas pelo ANAREDE original produzem um número excessivo de patamares, com grande irregularidade na distribuição dos mesmos.

#### 4.6.2 RSE com Carga Leve – Equivalência Numérica

Nesta comparação o passo de transferência do ANAREDE original foi ajustado para obter o mesmo incremento de geração utilizado pela versão com a metodologia proposta. Este passo é adequado ao tamanho do espaço de busca, reduzindo significativamente a quantidade de patamares gerados. Com isso um menor número de passos é necessário para que a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência percorra uma direção de transferência de geração até alcançar o limite de geração. Os passos de transferência adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares e o número de pontos da curva limite de geração são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados Carga Leve Equivalência Numérica

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	15,2	420	59	103
ANAREDE 40 Direções	15,2	420	113	207
Metodologia Proposta	5	420	57	110

Com a equivalência numérica dos incrementos de geração, a metodologia proposta produz um resultado numérico equivalente ao ANAREDE original com o *default* de 20 direções. Entretanto, se compararmos as distribuições dos patamares nas grades geradas pelo Matlab, mostradas nas Figuras 50 e 51, e a distribuição obtida pela metodologia proposta, mostrada na Figura 49, ainda é possível perceber uma melhor distribuição dos patamares nessa última.

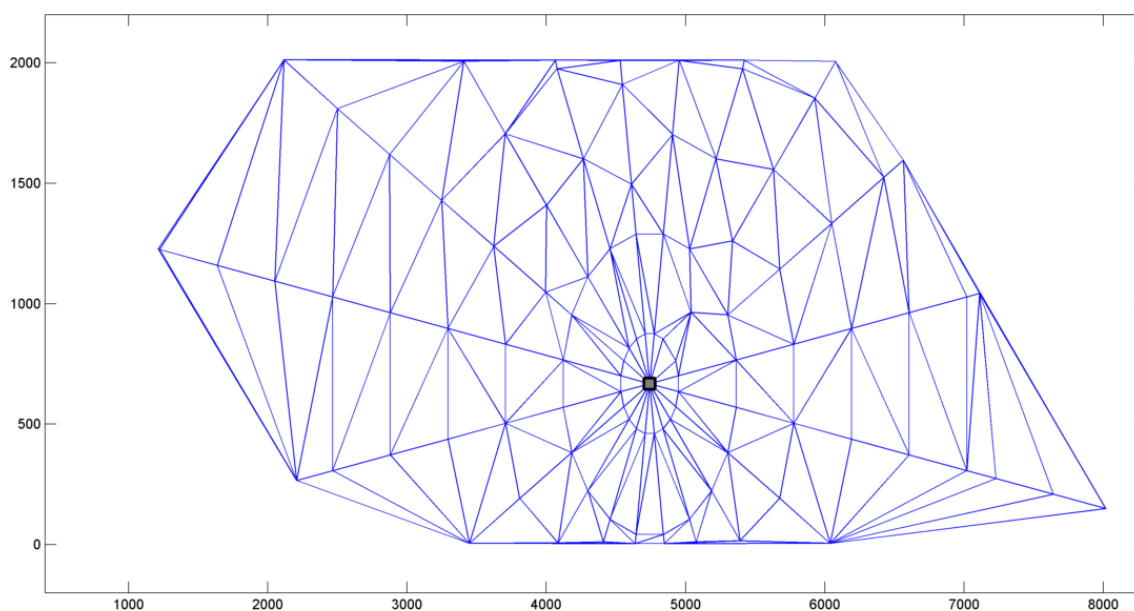


Figura 50 – Carga Leve – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica

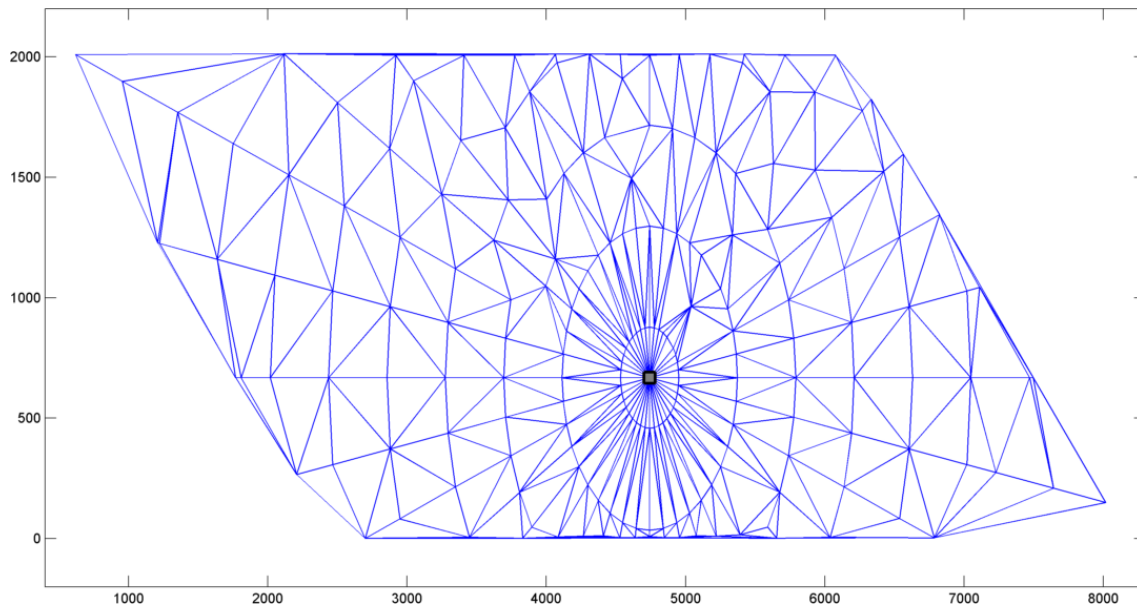


Figura 51 – Carga Leve – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica

#### 4.6.3 RSE do SIN – Avaliação da Cobertura

Sobrepondo as grades é possível comparar a cobertura das soluções. Não houve grande vantagem para a metodologia proposta quando comparada com a cobertura proporcionada pelo ANAREDE original utilizando 40 direções. Em relação à configuração com 20 direções existe uma diferença de cobertura em uma das extremidades, como mostrado nas Figuras 52 e 53.

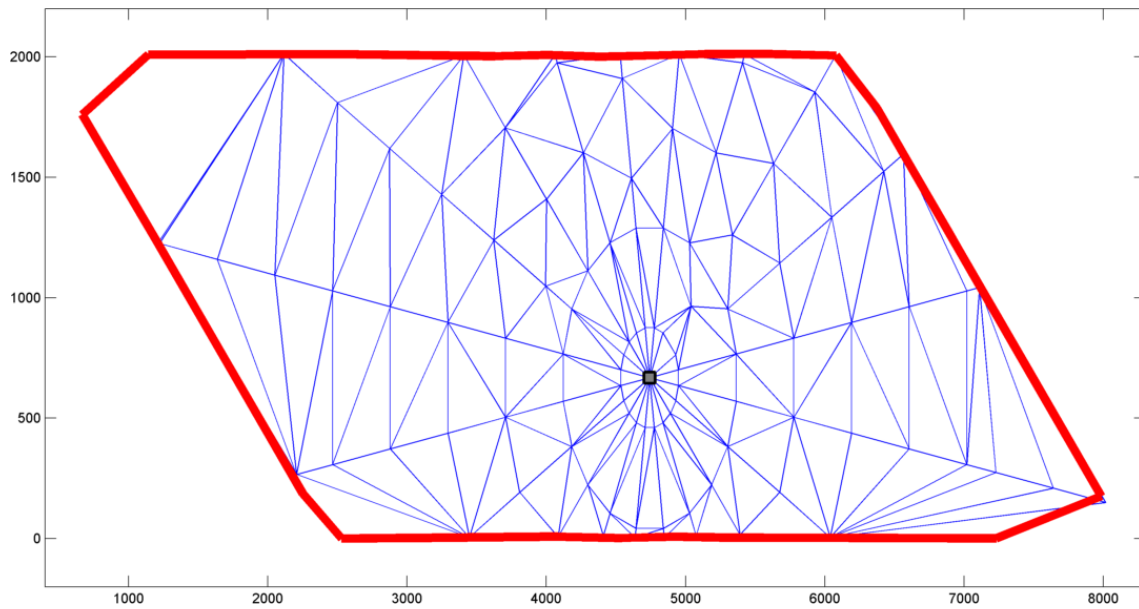


Figura 52 – Carga Leve – Sobreposição das Grades – 20 Direções

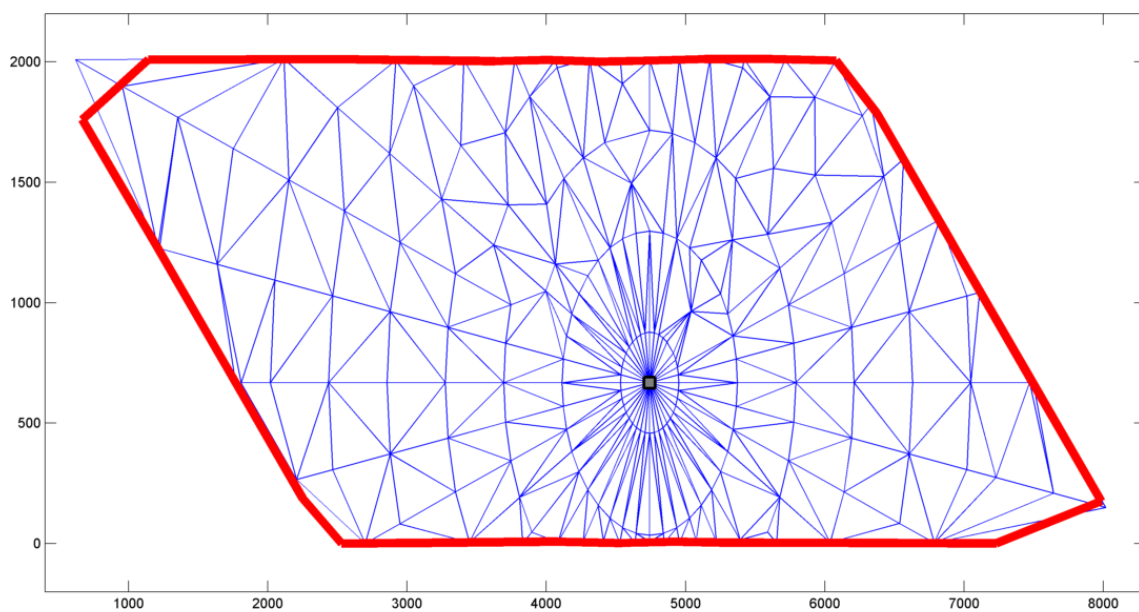


Figura 53 – Carga Leve – Sobreposição das Grades – 40 Direções

#### 4.6.4 RSE com Carga Média – Equivalência Percentual

Nesta configuração, devido ao regime de carga do sistema, o incremento de geração calculado pelo ANAREDE original tem seu valor próximo do incremento de

geração da metodologia proposta. Com isso os resultados da metodologia proposta se situam entre os resultados do ANAREDE original. As quantidades de patamares de geração criados sofrem influência da heurística da ferramenta de cálculo da máxima transferência de geração quando esta encontra limites de segurança, e estão com valores acima dos que seriam normalmente encontrados. Os passos de transferência adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares e o número de pontos da curva limite de geração são apresentados na Tabela 16

Tabela 16 – Resultados Carga Média Equivalência Percentual

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	5	275,8	105	110
ANAREDE 40 Direções	5	275,8	215	220
Metodologia Proposta	5	237	174	199

As grades geradas pelo Matlab que demonstram a distribuição dos patamares podem ser observadas nas Figuras 54, 55 e 56.

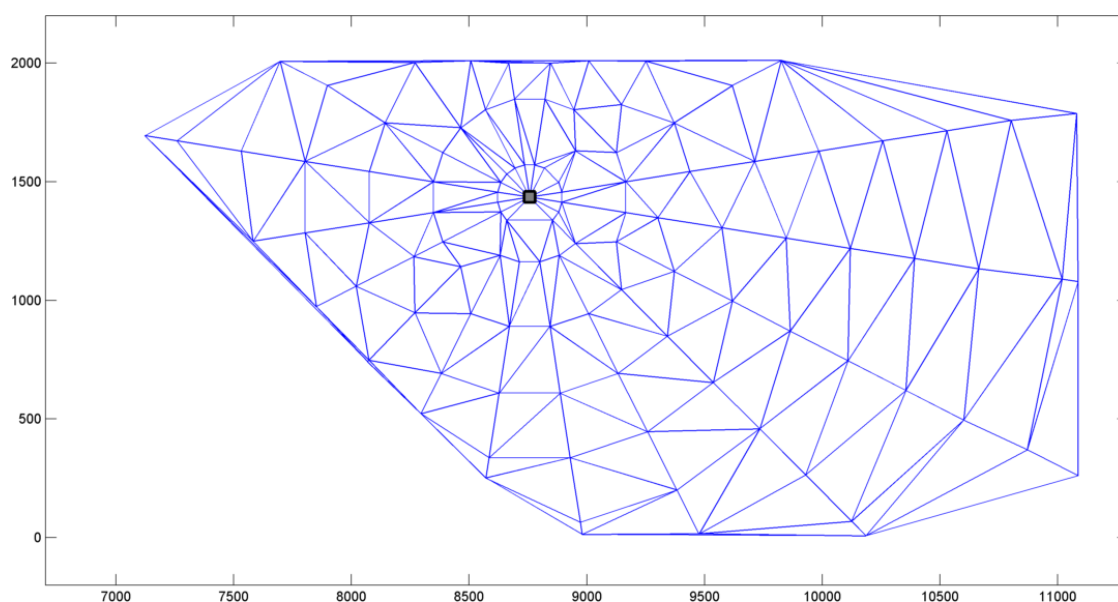


Figura 54 – Carga Média – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual

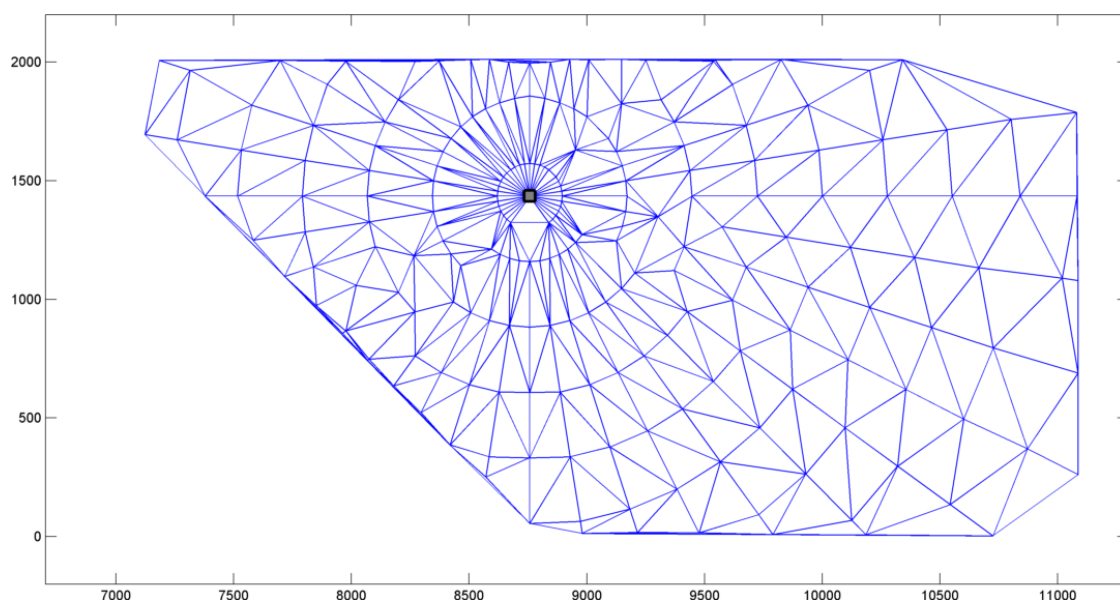


Figura 55 – Carga Média – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual

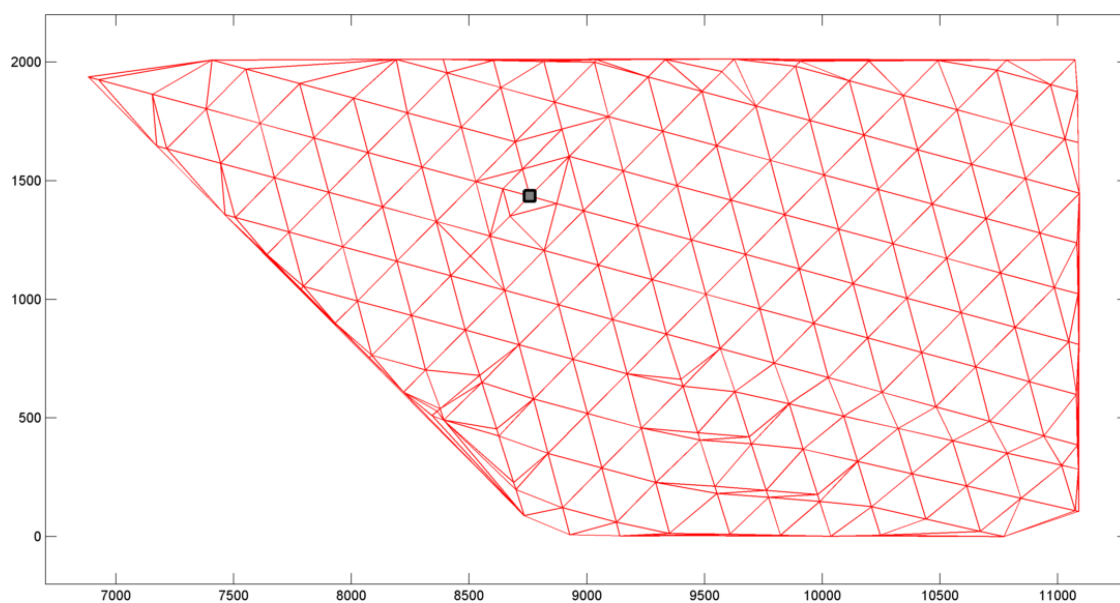


Figura 56 – Carga Média – Grade Gerada pela Metodologia Proposta

É possível notar um aumento considerável na quantidade de patamares gerados pela metodologia proposta em relação à quantidade gerada em regime de carga leve apresentada na Tabela 14. Isto ocorre devido a menor razão entre a altura e largura do espaço de busca G2xG3.

#### 4.6.5 RSE com Carga Média – Equivalência Numérica

Nesta comparação, mesmo com a equivalência numérica dos incrementos de geração, esses valores não são distantes o suficiente dos valores calculados pela equivalência percentual (Tabela 16) para produzirem resultados significativamente diferentes. Na comparação entre as quantidades de patamares gerados podemos perceber a proximidade de valores. Entretanto isso é decorrente dos patamares adicionais gerados em função da heurística da ferramenta de cálculo da máxima transferência de geração quando esta encontra limites de segurança. Os passos de transferência adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares, e o número de pontos da curva limite de geração são apresentados na Tabela 17

Tabela 17 – Resultados Carga Média Equivalência Numérica

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	4,3	237	102	110
ANAREDE 40 Direções	4,3	237	211	220
Metodologia Proposta	5	237	174	199

Se compararmos as distribuições dos patamares nas grades geradas pelo Matlab, mostradas nas Figuras 57 e 58, e a distribuição obtida pela metodologia proposta, mostrada na Figura 56, ainda é possível perceber uma melhor distribuição de patamares nessa última.

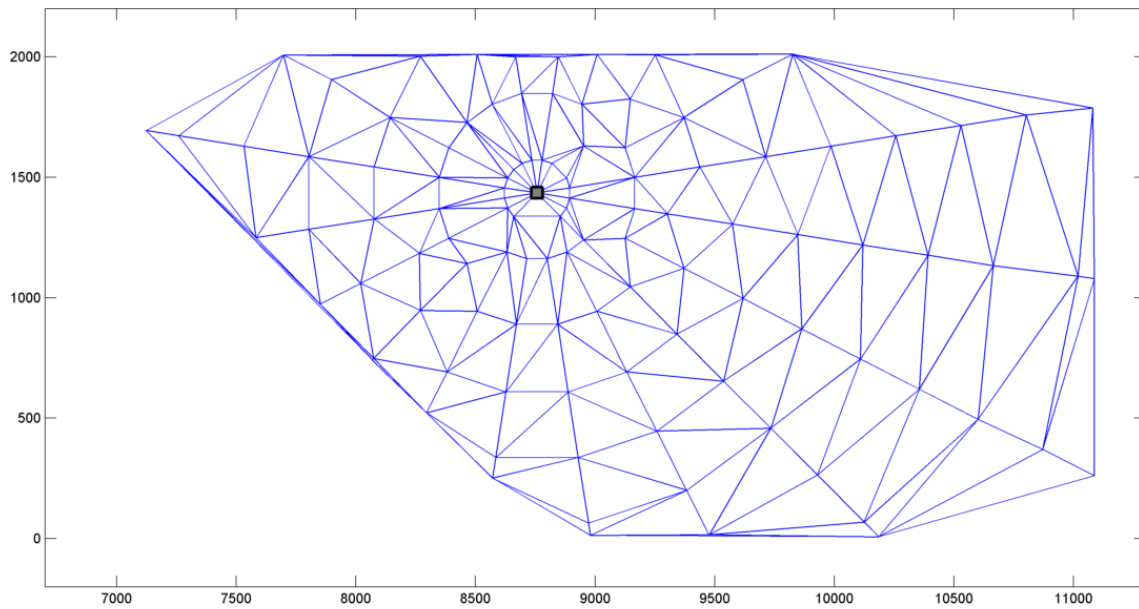


Figura 57 – Carga Média – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica

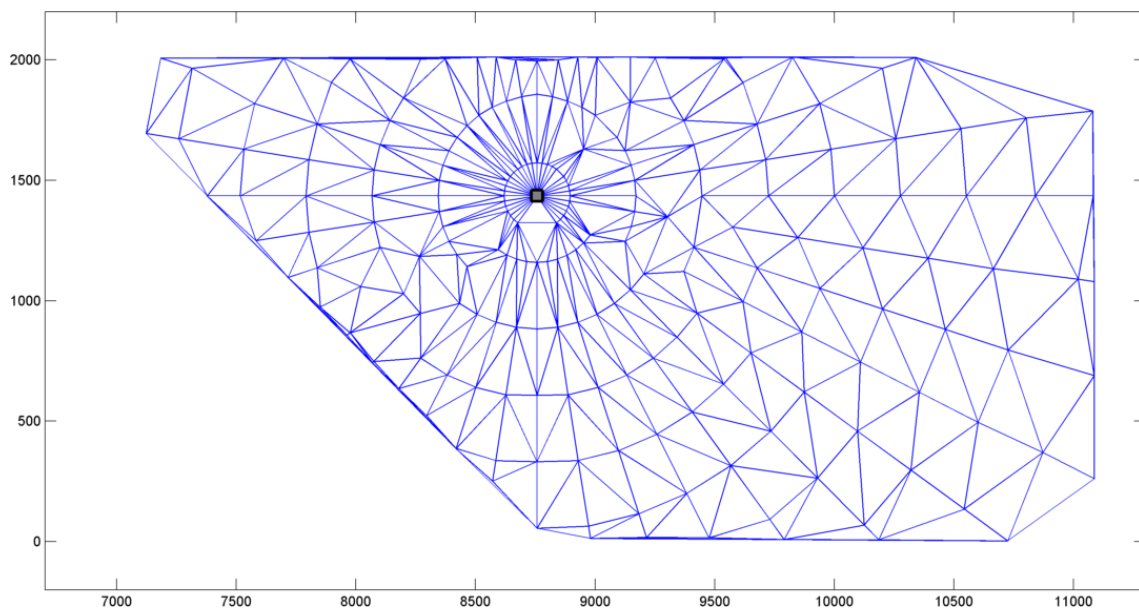


Figura 58 – Carga Média – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica

#### 4.6.6 RSE do SIN – Carga Média - Avaliação da Cobertura

Sobrepondo as grades é possível comparar a cobertura das soluções, sendo possível perceber pequenas diferenças de cobertura nas extremidades, com um pior



resultado para a configuração de 20 direções do ANAREDE original, conforme esperado (Figuras 59 e 60).

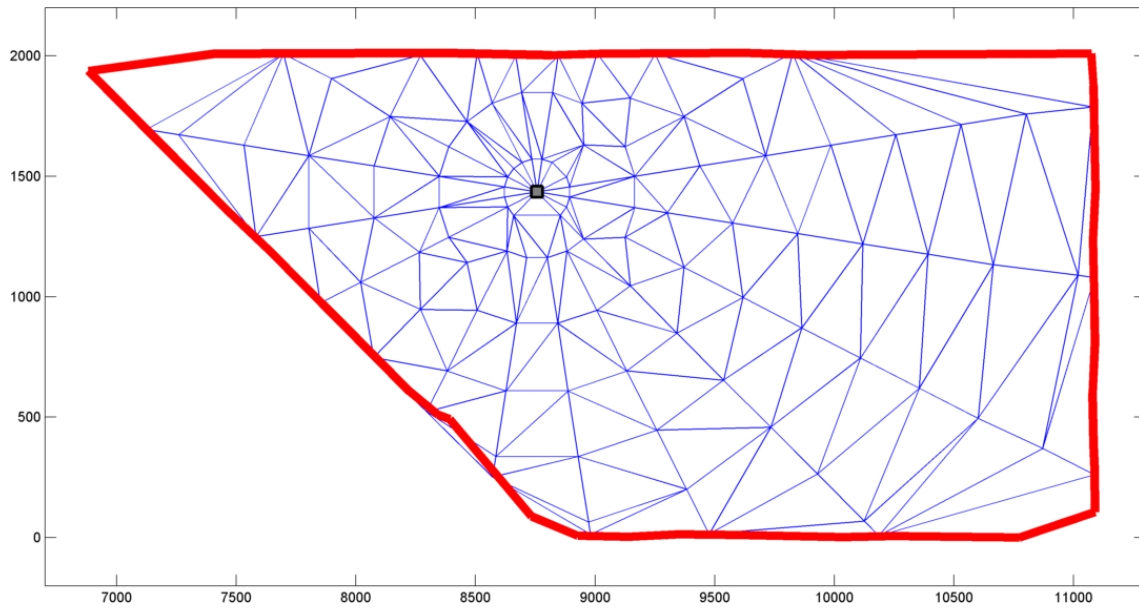


Figura 59 – Carga Média - Sobreposição das Grades – 20 Direções

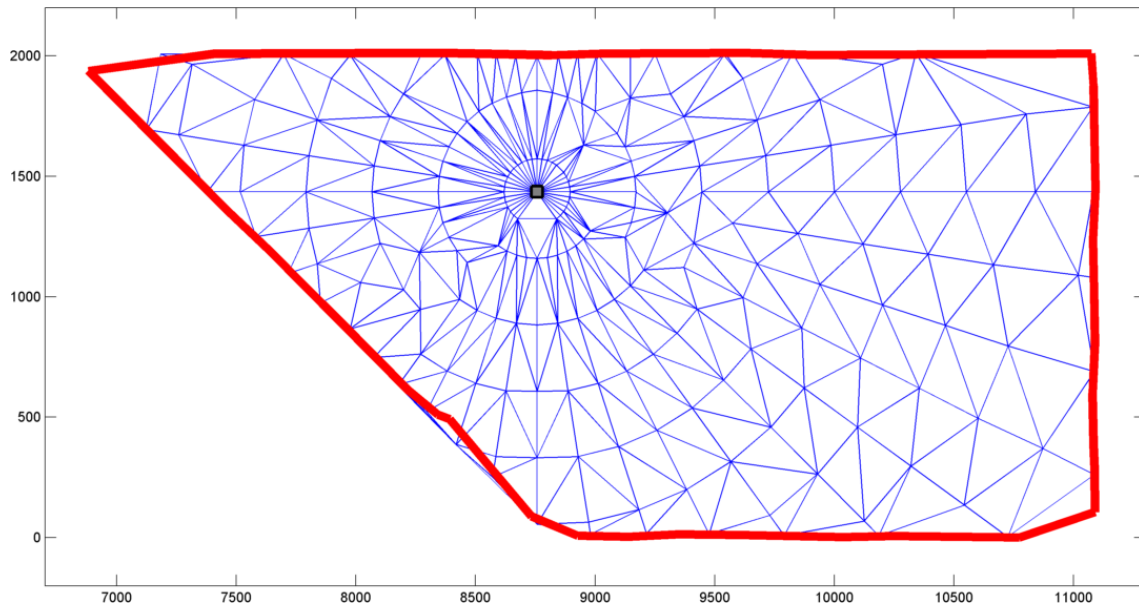


Figura 60 – Carga Média - Sobreposição das Grades – 40 Direções

#### 4.6.7 RSE com Carga Pesada

Nesta comparação o incremento de geração calculado pelo ANAREDE original é grande e os limites de geração ficam próximos ao ponto de operação atual. Neste caso, o passo de transferência de geração precisa ser pequeno para que a ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência ativa possa percorrer uma direção até alcançar o limite de geração, explorando minuciosamente a RSE. É possível notar uma grande influência da heurística da ferramenta de cálculo da máxima transferência de geração no ANAREDE original, elevando os tempos de execução. Os passos de transferência adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares e o número de pontos da curva limite de geração são apresentados na Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 – Resultados Carga Média Equivalência Percentual

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	5	327,6	44	36
ANAREDE 40 Direções	5	327,6	86	72
Metodologia Proposta	5	91	83	150

As grades geradas pelo Matlab que demonstram a distribuição dos patamares podem ser observadas nas Figuras 61, 62 e 63.

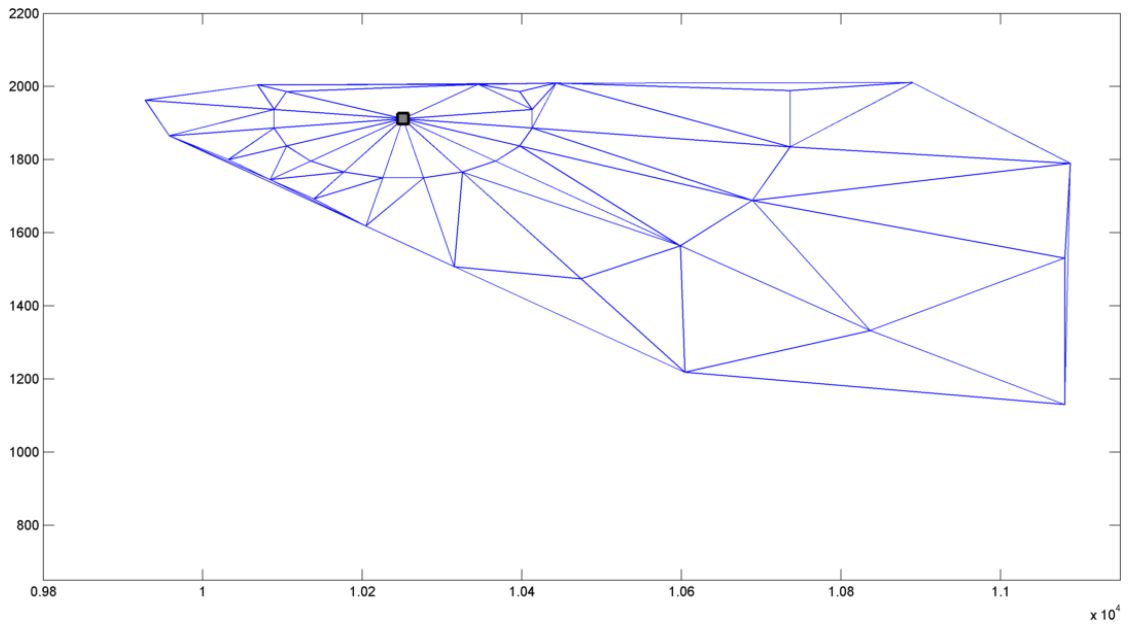


Figura 61 – Carga Pesada – Grade 20 Direções – Equivalência Percentual

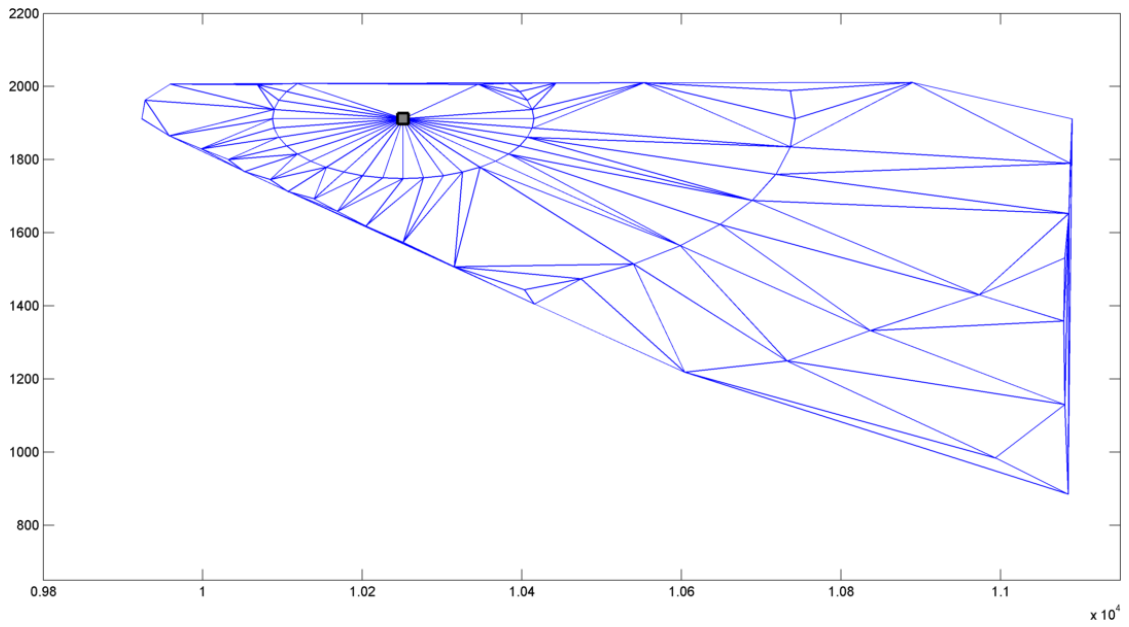


Figura 62 – Carga Pesada – Grade 40 Direções – Equivalência Percentual

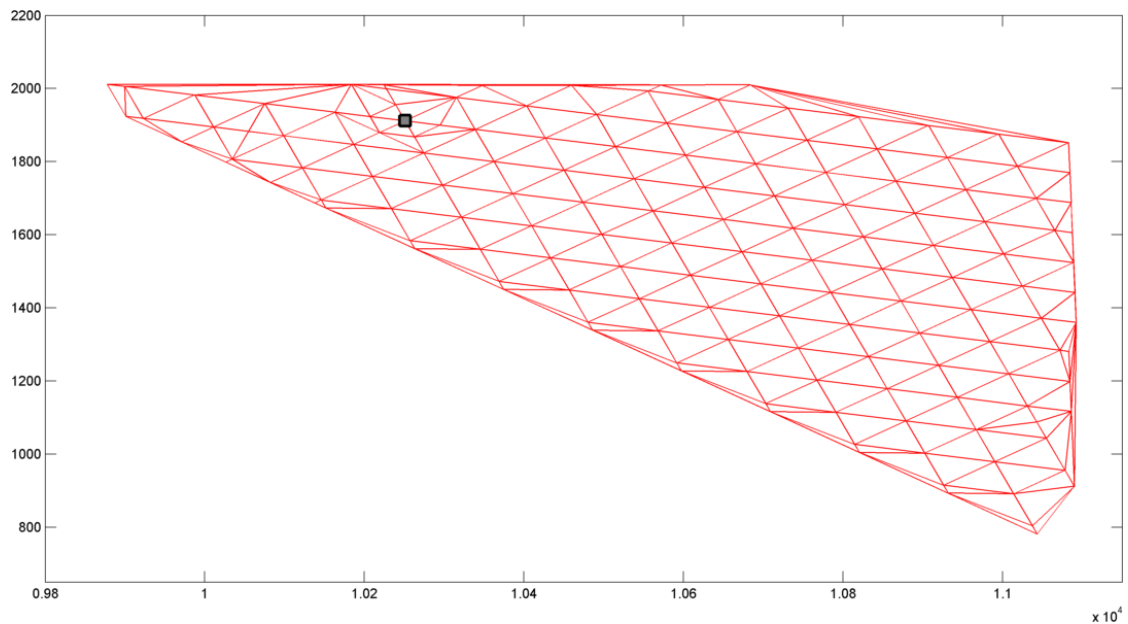


Figura 63 – Carga Pesada – Grade Gerada pela Metodologia Proposta

É possível notar uma significativa diferença de resultados. As grades geradas pelo ANAREDE original produzem um número insuficiente de patamares de geração, com grande irregularidade na distribuição dos mesmos.

#### 4.6.8 RSE com Carga Pesada – Equivalência Numérica

Nesta comparação a equivalência numérica dos incrementos de geração faz com que o ANAREDE original produza resultados muito melhores. Ainda assim, na configuração de 20 direções existem zonas de incerteza devido à proximidade do ponto de operação atual dos limites de geração. Na configuração de 40 direções essas zonas de incerteza são menores, mas o tempo computacional e a quantidade de patamares aumentam significativamente. Os passos de transferência adotados, os tempos de construção, as quantidades de patamares e o número de pontos da curva limite de geração são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados Carga Pesada Equivalência Numérica

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo (s)	Patamares
ANAREDE 20 Direções	1,39	91	63	101

ANAREDE 40 Direções	1,39	91	137	205
Metodologia Proposta	5	91	83	150

Se compararmos as distribuições dos patamares nas grades geradas pelo Matlab, mostradas nas Figuras 64 e 65, e a distribuição obtida pela metodologia proposta, mostrada na Figura 63, ainda é possível perceber uma melhor distribuição de patamares nessa última.

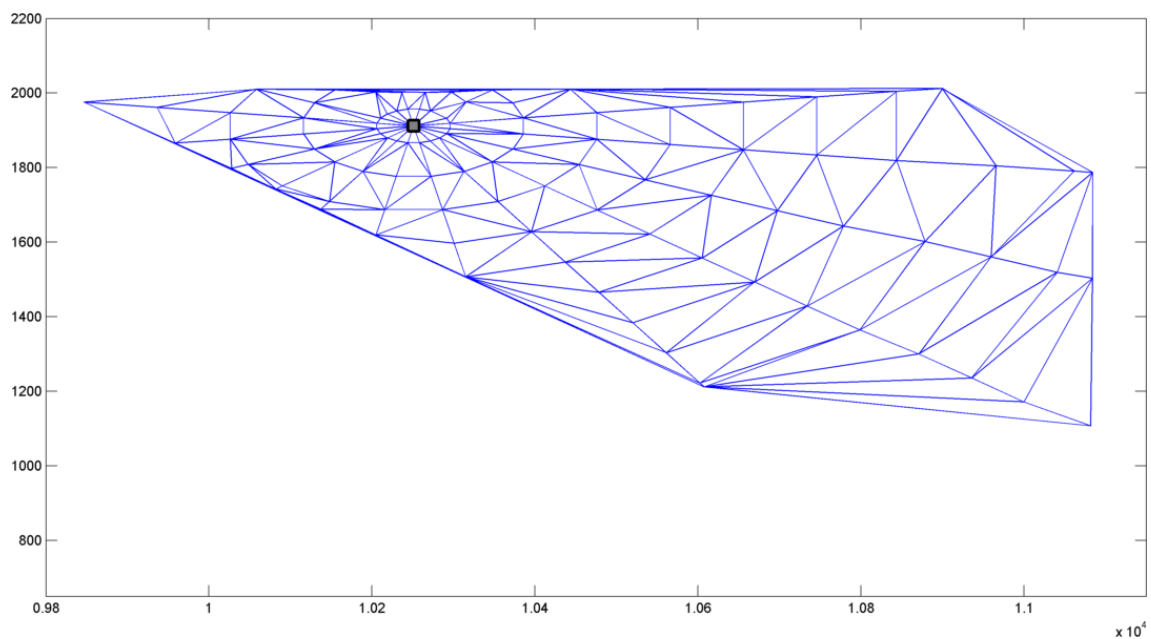


Figura 64 – Carga Pesada – Grade 20 Direções – Equivalência Numérica

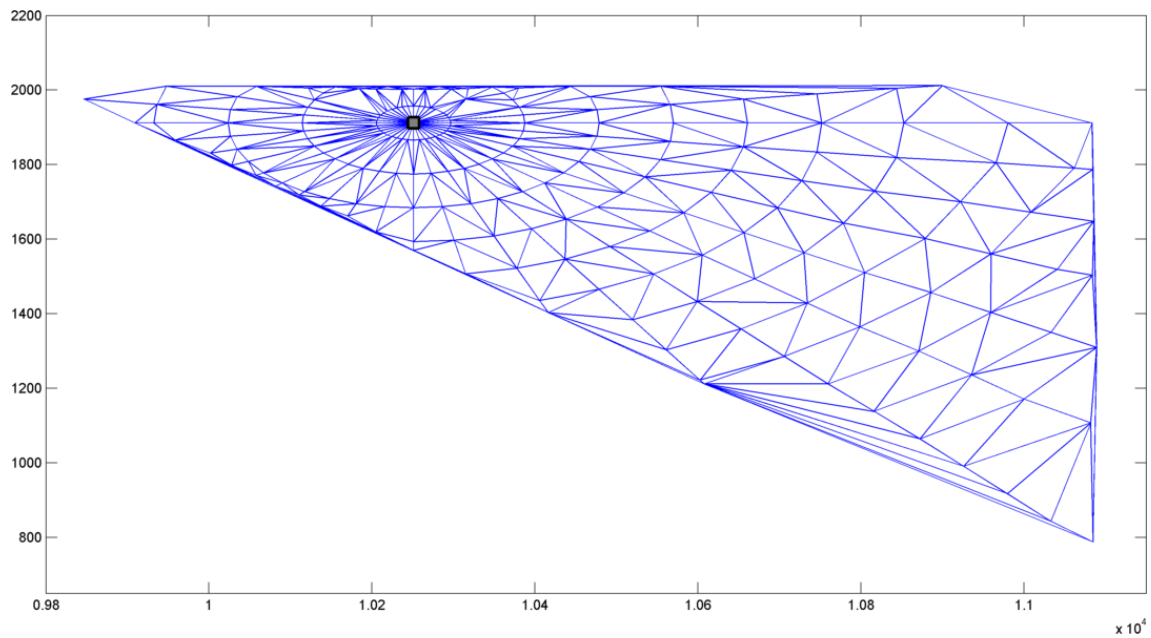


Figura 65 – Carga Pesada – Grade 40 Direções – Equivalência Numérica

#### 4.6.9 RSE do SIN – Carga Pesada - Avaliação da Cobertura

Sobrepondo as grades das figuras é possível comparar a cobertura das soluções. Podemos observar que neste caso o ANAREDE original com 20 direções obteve cobertura inferior à metodologia proposta, enquanto o ANAREDE original com 40

direções obteve cobertura equivalente à metodologia proposta. As sobreposições das grades são mostradas nas Figuras 66 e 67.

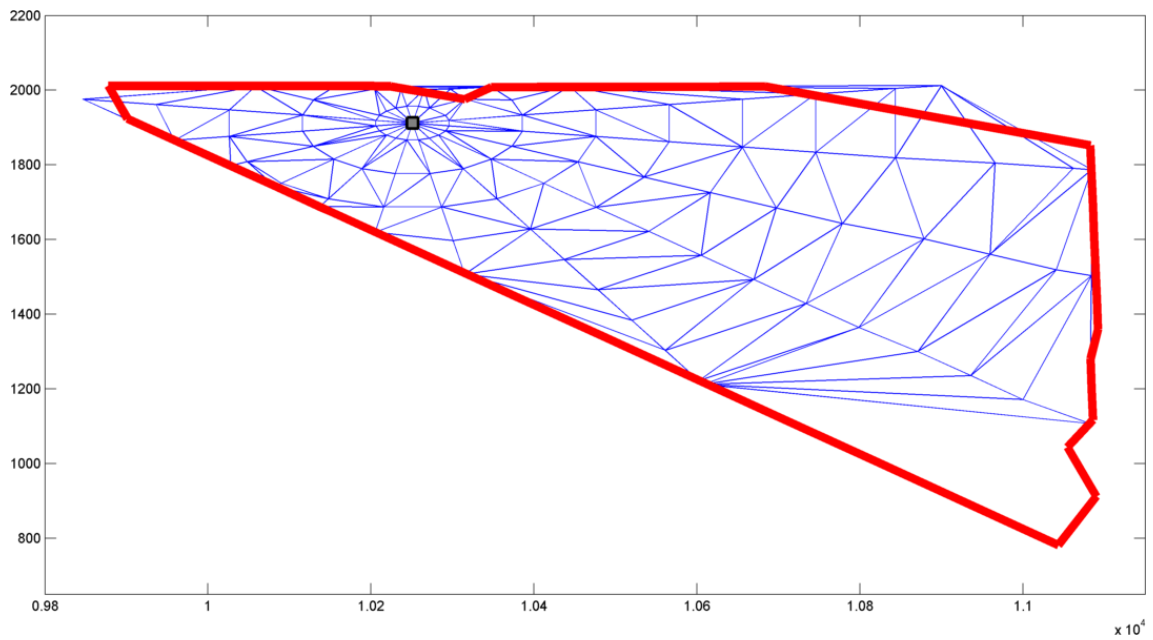


Figura 66 – Carga Pesada - Sobreposição das Grades – 20 Direções

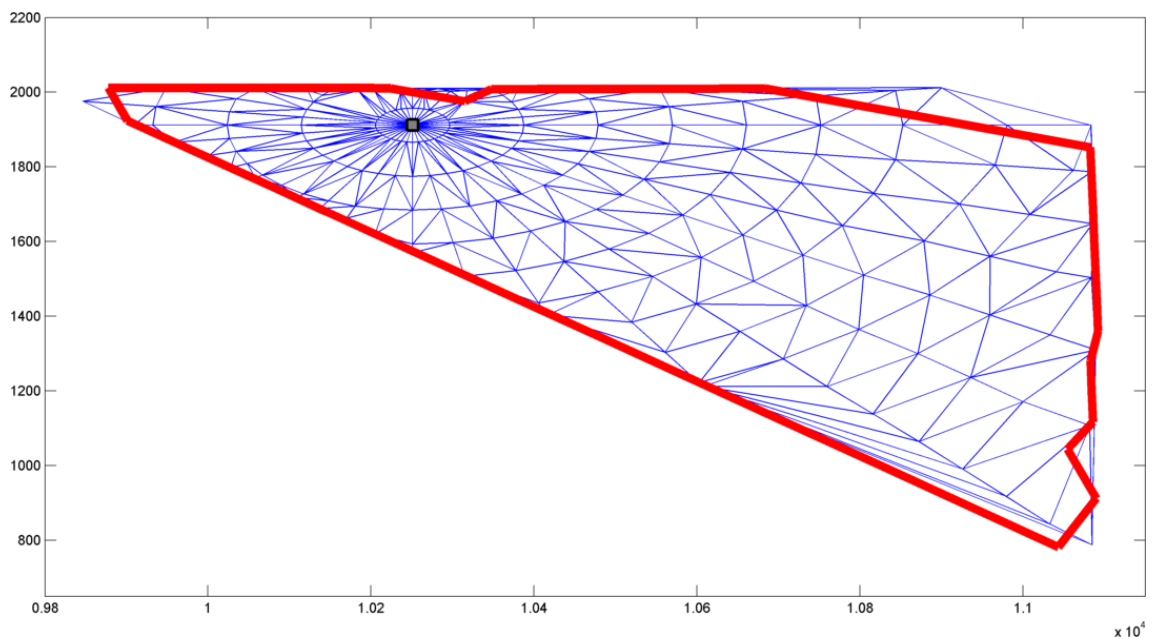


Figura 67 – Carga Pesada - Sobreposição das Grades – 40 Direções

#### 4.6.10 Comparativo por Regime de Carga

Os resultados numéricos apresentados para diferentes regimes de carga do SIN mostram que a construção da RSE é afetada sensivelmente quando se utiliza o passo de transferência fixo no ANAREDE original. Também fica evidente a menor influência do regime de carga sobre o processo de construção da RSE utilizado na metodologia proposta, como podemos observar na Figura 68.

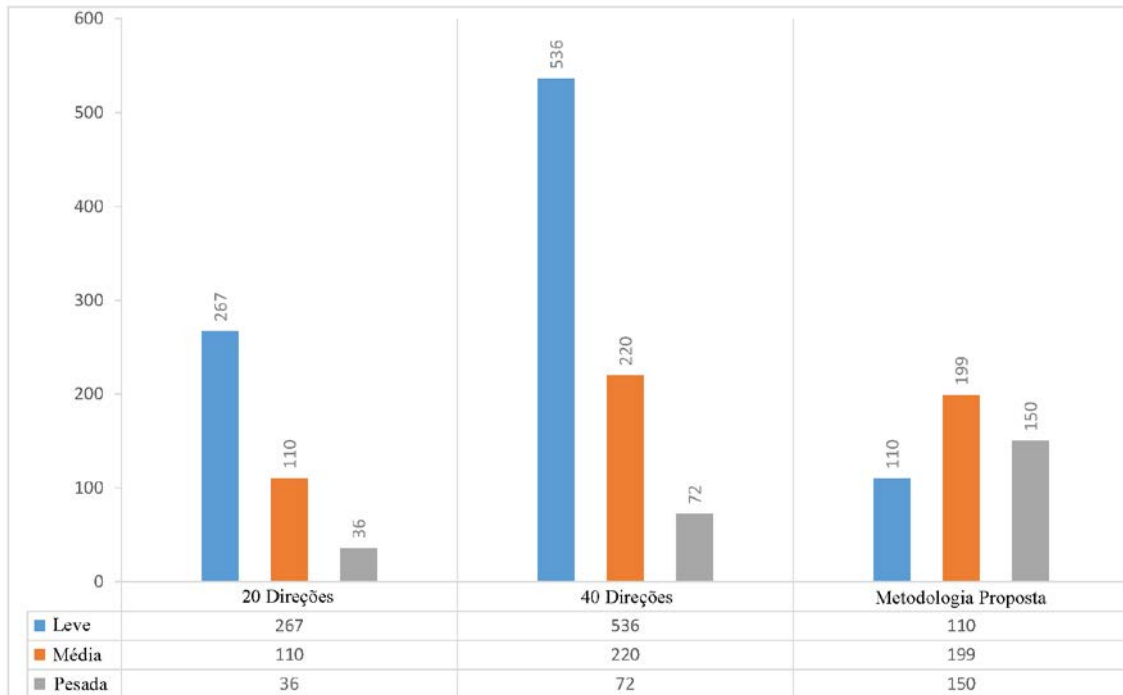


Figura 68 – Quantidade de Patamares por Regime de Carga

Os gráficos e nomogramas apresentados para cada regime de carga não mostram isto claramente pois as ferramentas de visualização, seja o VisorChart ou o MatLab, ajustam automaticamente os eixos cartesianos para um melhor enquadramento dos nomogramas, mostrando apenas o espaço de busca em que o ANAREDE trabalhou para criação dos patamares. Este ajuste automático não deixa evidente o posicionamento do nomograma em relação à capacidade total de geração dos grupos. Alterando-se manualmente a definição desses eixos para a capacidade total de cada grupo e sobrepondo os gráficos, obtemos uma visualização comparativa da localização das grades para o ANAREDE original, das grades para a metodologia proposta, e dos nomogramas em relação ao espaço total de geração dos grupos, como mostram as Figuras 69, 70 e 71 respectivamente.



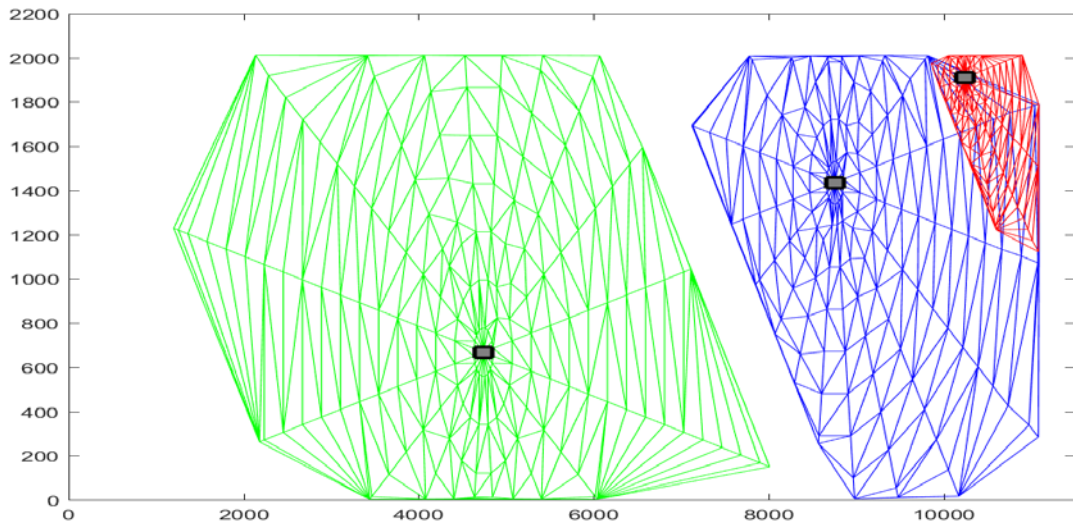


Figura 69 – Grade Comparativa por Regime de Carga - ANAREDE

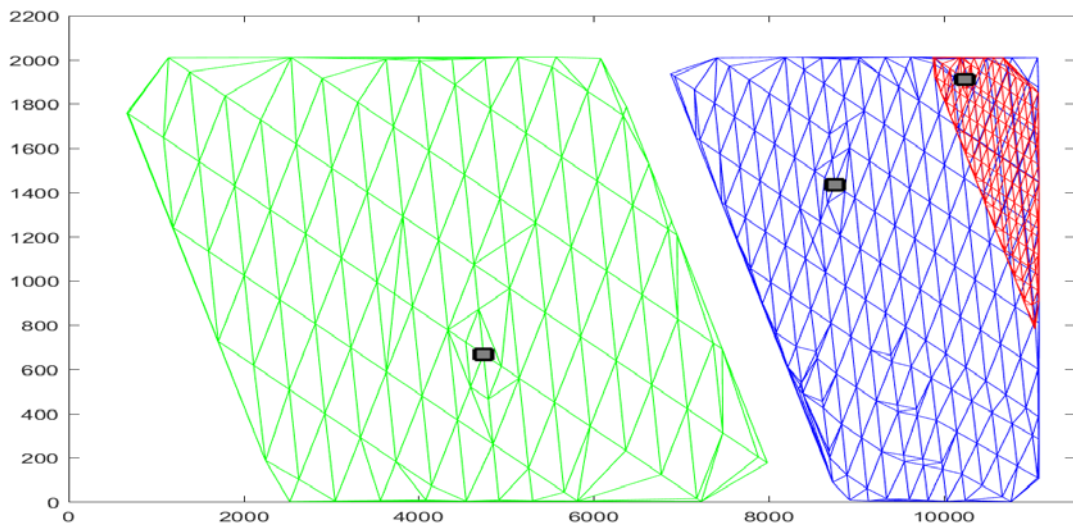


Figura 70 – Grade Comparativa por Regime de Carga - Metodologia

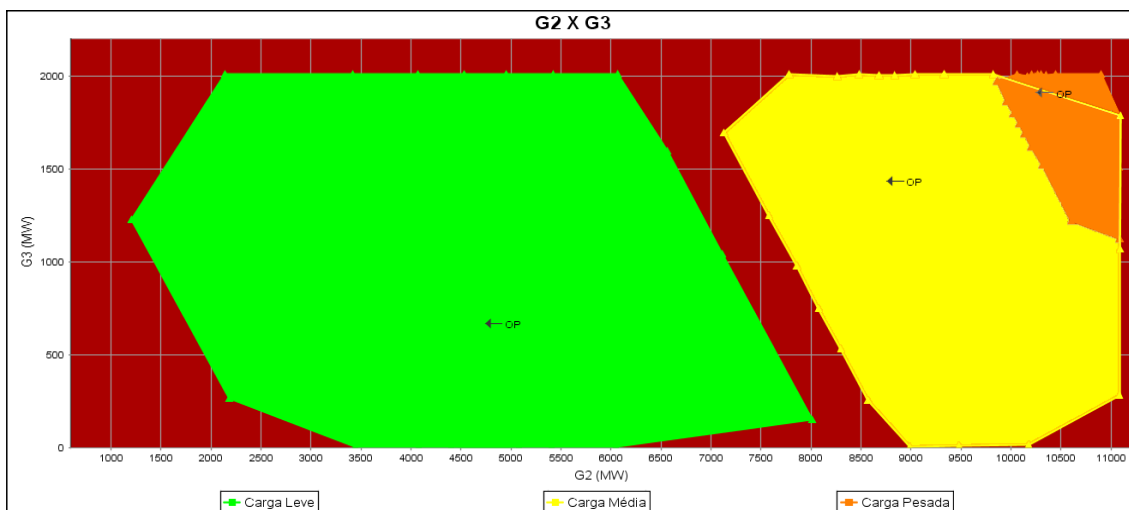


Figura 71 – Nomograma Comparativo por Regime de Carga - ANAREDE

#### 4.7 INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO INICIAL

A localização do ponto de operação inicial interfere diretamente na precisão e no esforço computacional envolvido na construção da RSE. O melhor comportamento do método de direções radiais ocorre quando o ponto de operação está localizado no centro do espaço de busca de soluções viáveis. Quando essa localização se afasta do centro em direção às bordas da RSE, podemos verificar duas características negativas:

- Aumento da distância entre os pontos extremos de direções de transferência de geração adjacentes do lado oposto da RSE.
- Aumento do custo computacional na busca dos limites em direções de transferência de geração em que a distância entre o ponto de operação inicial e o ponto de operação limite é reduzida. Isso se deve à estratégia da ferramenta de cálculo da máxima transferência de potência, a qual utiliza sucessivas divisões do incremento/decremento de geração quando o fluxo de potência não converge ou quando algum limite de segurança monitorado é alcançado.

Para ilustrar a influência da localização do ponto de operação inicial, foram produzidas duas simulações baseadas no espaço de busca do SIN em Regime de Carga Pesada. Essas simulações, realizadas no Matlab, produzem as 20 direções default do ANAREDE original, posicionando o ponto de operação inicial no centro do espaço de

busca, Figura 72, e no local do ponto de operação inicial do caso de carga pesada, Figura 73.

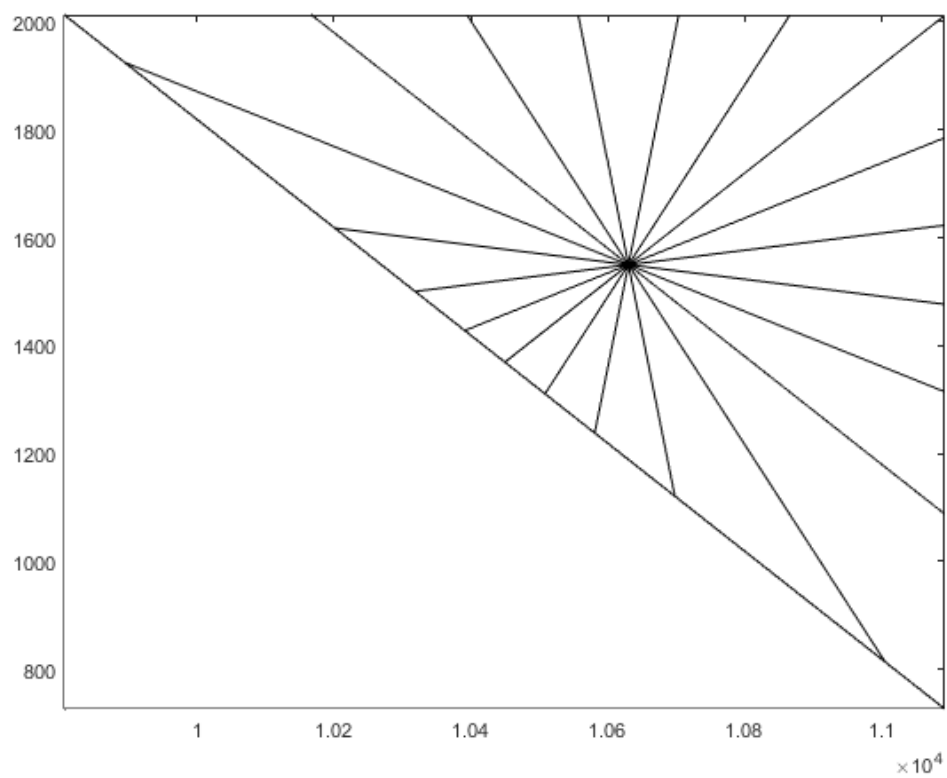


Figura 72 – Ponto de Operação Inicial Centralizado

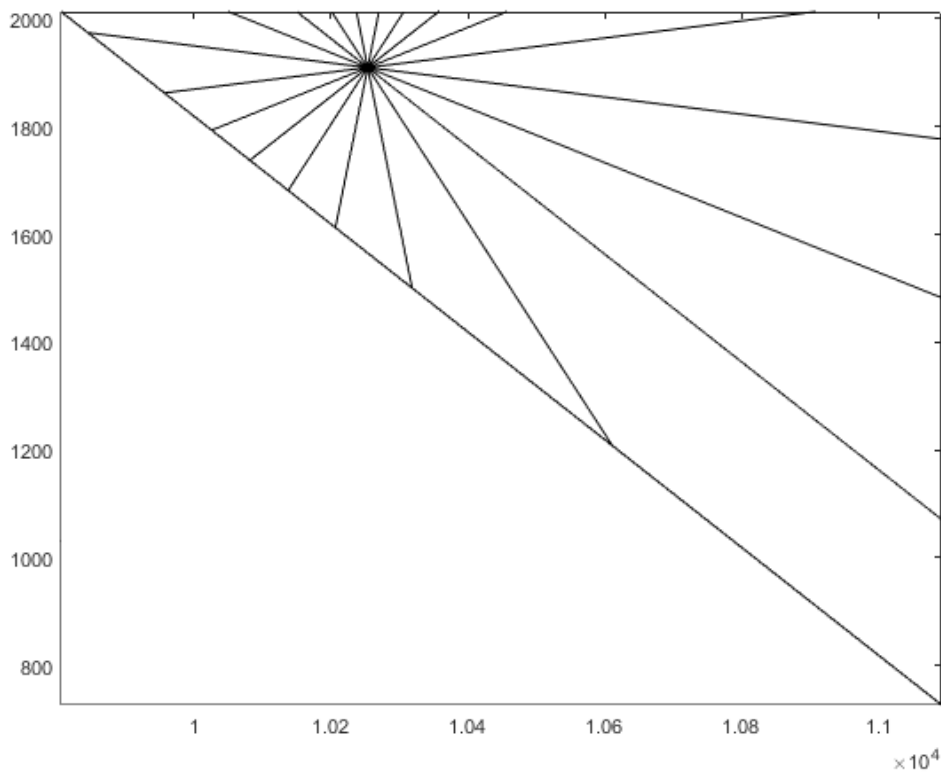


Figura 73 – Ponto de Operação Inicial em Carga Pesada

#### 4.8 ESTUDO DO ESPAÇO DE BUSCA DE SOLUÇÕES VIÁVEIS

O espaço de busca de soluções viáveis é definido pelos valores mínimo e máximo de geração para os grupos G1, G2 e G3, dando origem a um paralelepípedo retangular no espaço  $G1 \times G2 \times G3$ . A projeção deste paralelepípedo retangular no plano  $G2 \times G3$  tem a forma de um retângulo que, na metodologia proposta, serve de base para o cálculo do incremento de geração, como visto no Capítulo 3. Nos resultados apresentados neste capítulo, é possível observar que o espaço de busca retangular nem sempre é retangular, pois frequentemente é delimitado por retas que não formam um ângulo reto com o eixo G2.

O estudo realizado por (SARMIENTO, et al. 2009), identifica esse tipo de reta como sendo o carregamento do sistema formado pelos grupos que compõem os eixos do nomograma, nesse caso G2 e G3, como mostra a Figura 74.

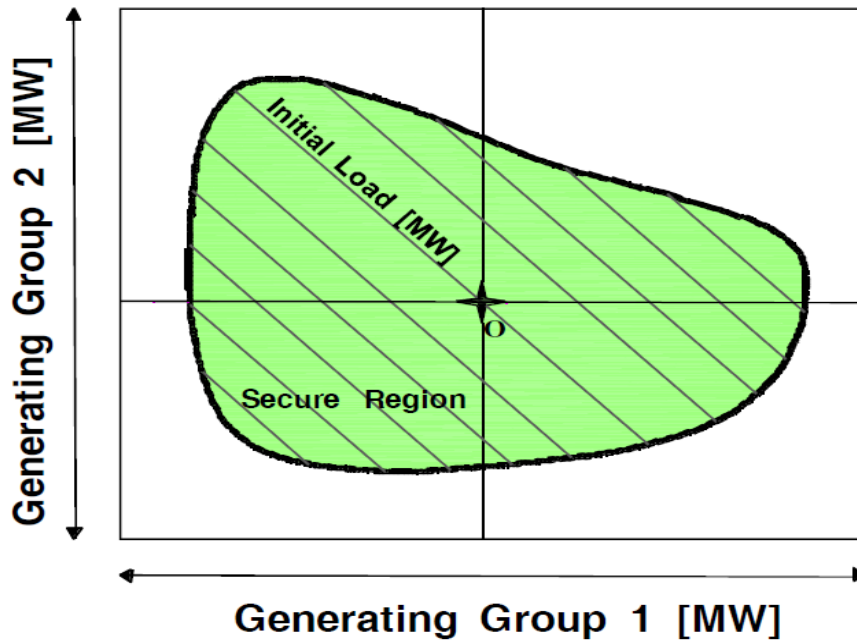


Figura 74 – Representação do Nomograma de (SARMIENTO, *et al.* 2009)

Transportando esse conceito para o SEP subdividido em três grupos de geração, o carregamento representado por essa reta corresponde à diferença entre o despacho total e a geração do grupo G1. Neste cenário podem ser observadas duas retas limitantes distintas: a esquerda quando G1 é máximo e a direita quando G1 é mínimo. O aparecimento da reta limitante à esquerda do espaço de busca ocorre nas situações em que a geração máxima de G1 não é suficiente para atender a toda a demanda do sistema, fazendo com que G2 e G3 supram esta demanda e impedindo que a extremidade inferior esquerda do espaço de busca coincida com a origem. O aparecimento dessa reta limitante à direita do espaço de busca ocorre quando a geração de G1 é a mínima possível para o grupo. Nesse caso as gerações dos grupos G2 e G3 são suficientes para atender à demanda total do sistema, impedindo que o espaço de busca termine no ponto representado por G2 máximo e G3 máximo.

Nos resultados apresentados neste capítulo podemos observar a presença destas retas tanto em regime de carga leve (duas retas) quanto em regime de carga pesada (uma reta). As Tabelas 20 e 21 mostram as gerações limite dos grupos para formação do espaço de busca.

Tabela 20 – Limites do Espaço de Busca em Carga Leve

Carga Leve					
Grupo	Geração Máxima (MW)	Ponto de Operação (MW)	Demanda (MW)	G1 Máximo (MW)	G1 Mínimo (MW)
G1	6896	2758	8168	6896	0
G2	13106	4742		1272	8168
G3		668			

Tabela 21 – Limites do Espaço de Busca em Carga Pesada

Carga Pesada					
Grupo	Geração Máxima (MW)	Ponto de Operação (MW)	Demanda (MW)	G1 Máximo (MW)	G1 Mínimo (MW)
G1	6896	6553	18716	6896	5610
G2	13106	10251		11820	13106
G3		1912			

É possível observar que, em regime de carga leve, existe a necessidade de participação dos grupos G2 e G3 quando G1 é máximo, resultando na reta limitante à esquerda, e da geração combinada dos grupos G2 e G3 inferior ao máximo combinado desses grupos, resultando na reta limitante à direita. O formato resultante dessas limitações está ilustrado na Figura 75.

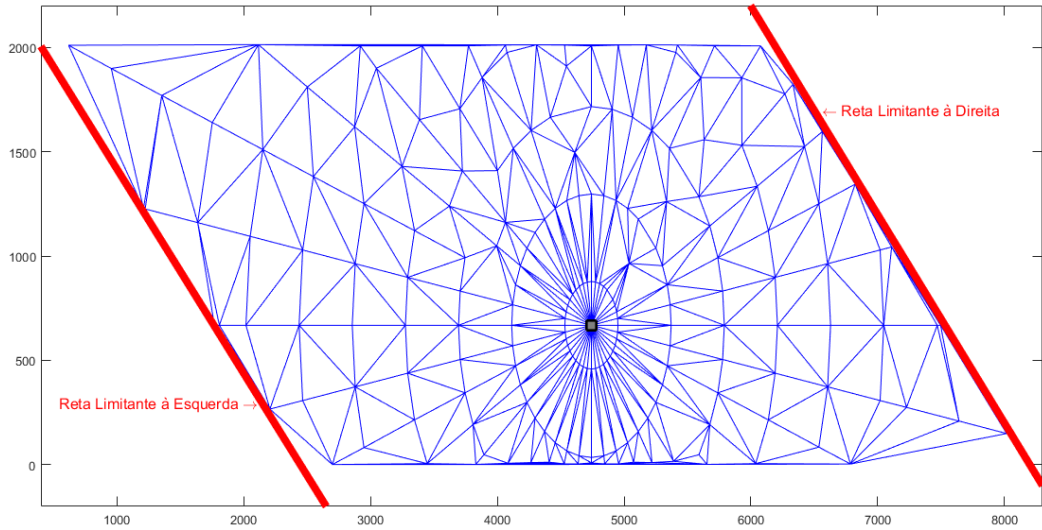


Figura 75 – Retas Limitantes em Carga Leve

É possível observar que, em regime de carga pesada, existe a necessidade de uma participação significativa dos grupos G2 e G3 quando G1 é máximo, resultando na reta limitante à esquerda, e da geração combinada dos grupos G2 e G3 igual à máxima geração combinada desses grupos, impedindo o aparecimento da reta limitante à direita. O formato resultante destas limitações está ilustrado na Figura 76.

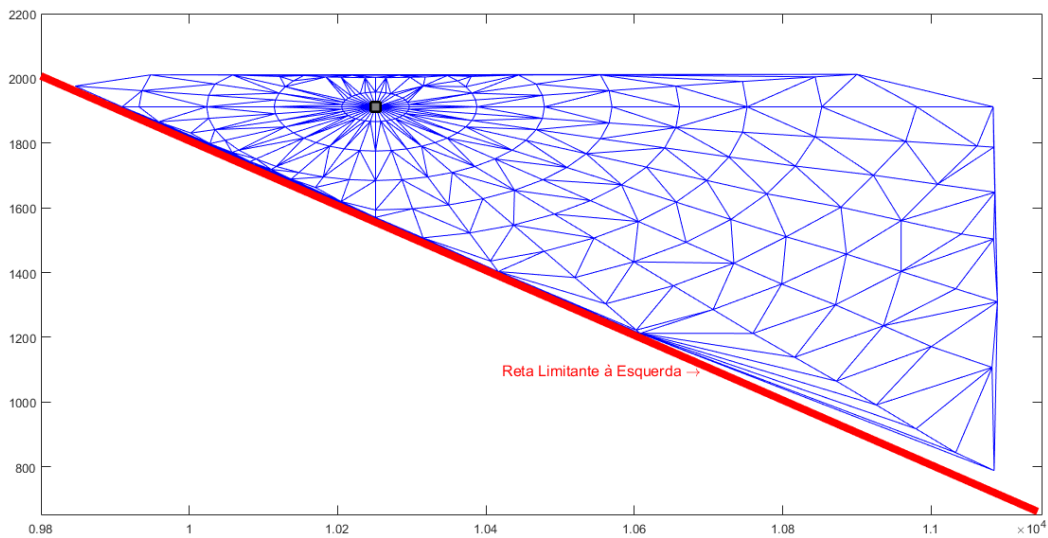


Figura 76 – Retas Limitantes em Carga Pesada

Essas limitações fazem com que o espaço de busca seja menor do que a projeção do paralelepípedo retangular em G2xG3, reduzindo a quantidade de patamares de geração criados durante a construção da RSE, o que justifica as variações na quantidade de patamares gerados observadas na Figura 68.

#### 4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram que, em todos os casos analisados, a configuração *default* do ANAREDE de 20 direções gera RSEs com uma cobertura inferior àquela obtida pela metodologia proposta. Além disso, as características do processo de construção da RSE baseado em direções de transferência de geração radiais é incapaz de reduzir a área das zonas de incerteza. Também é impossível determinar a quantidade mínima de patamares necessária para uma cobertura adequada do espaço de soluções viáveis devido à grande influência da localização do ponto de operação no método baseado em direções de transferência de geração radiais.

Na comparação baseada no regime de carga do SIN é possível observar grandes diferenças entre os espaços de busca de soluções viáveis. Em um ambiente de operação de tempo real, as restrições de tempo e capacidade de processamento limitam a quantidade de soluções que podem ser avaliadas dentro da janela de tempo disponível. No método de direções radiais essa quantidade não pode ser estimada previamente, pois os parâmetros de controle, número de direções e passo de transferência, são fatores independentes da dimensão do espaço de busca de soluções viáveis. A utilização do método baseado em direções de transferência de geração radiais neste contexto exige que estes parâmetros sejam definidos de forma conservadora, gerando resultados com uma cobertura reduzida do espaço de soluções viáveis e áreas de incerteza consideráveis. A Figura 77, criada a partir de uma montagem do nomograma gerado para o Sistema Teste 9 Barras com a sobreposição dos patamares gerados, ilustra como a configuração *default* de 20 direções do ANAREDE original não cobre as áreas mais extremas do espaço de busca, assim como cria grandes zonas de incerteza em regiões distantes do ponto de operação atual.



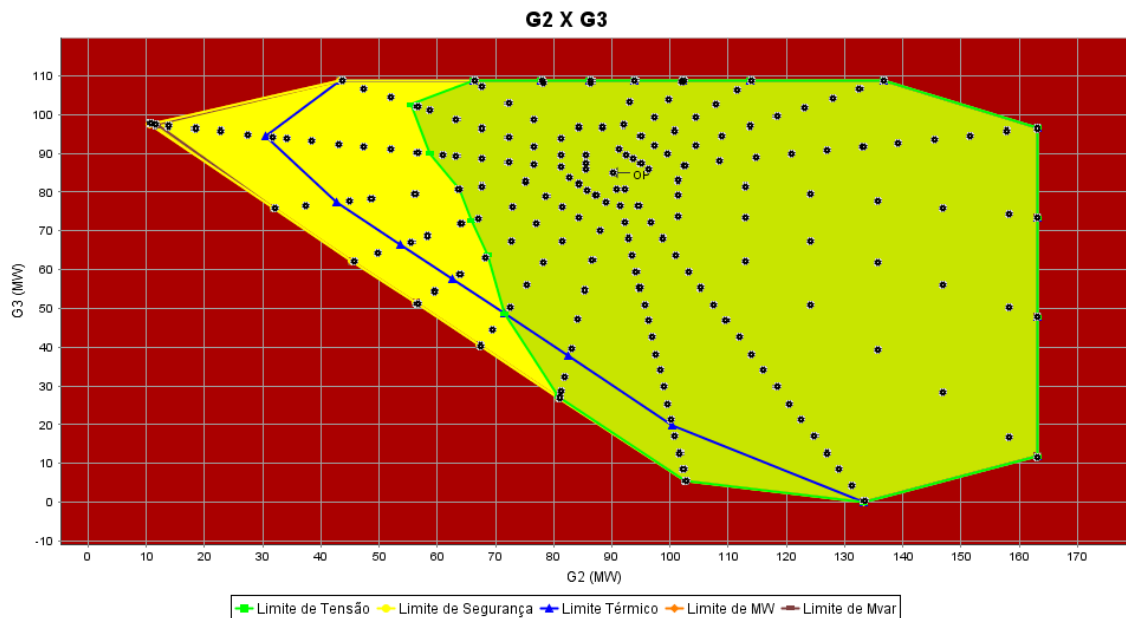


Figura 77 – Sobreposição do Nomograma com os Patamares Gerados

Também é importante notar o difícil equilíbrio entre o número de direções e o passo de transferência. A adoção de um grande número de direções para aumentar a precisão do contorno da região de segurança exige a adoção de um passo de transferência elevado, o que pode levar a incrementos de geração que comprometem a convergência do fluxo de potência, ocasionando eventualmente curvas limite mais restritivas ou elevação do tempo computacional, em função das sucessivas divisões do incremento de geração para alcançar o limite. Em contrapartida, privilegiar o passo de transferência em relação ao número de direções pode gerar regiões de segurança com menor cobertura do espaço de busca de soluções viáveis, em função dos poucos pontos que compõem as curvas limite.

A metodologia proposta apresenta como solução para estes problemas o incremento de geração e a distribuição dos patamares de geração adaptáveis às dimensões do espaço de busca, conforme demonstrado pelos resultados.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

A avaliação de segurança de SEP tem se mostrado cada vez mais importante no cenário atual do setor elétrico, com demanda crescente, restrições de investimento, novos aproveitamentos hidrelétricos de grande porte a fio d'água e modificação da matriz energética brasileira, com o aumento da participação de fontes de energia renovável sazonais e intermitentes. Com isso, torna-se indispensável avaliar as opções de suprimento da carga e as condições de segurança de operação de forma confiável, rápida e precisa.

A região de segurança estática é uma importante ferramenta para esse monitoramento e um pré-requisito para uma etapa subsequente de avaliação de segurança dinâmica. Entretanto, sua utilização em tempo real nos centros de controle exige a construção de regiões de segurança dentro de uma janela de tempo restrita. A natureza dos cálculos envolvidos na avaliação de segurança estática utilizando o algoritmo de fluxo de potência convencional (Newton-Raphson) é muito rápida, se comparada ao elevado tempo necessário para a avaliação de segurança dinâmica. No entanto, o número de patamares de geração a serem inspecionados na fase de avaliação de segurança dinâmica são consequência direta da estratégia adotada na construção da RSE. Em função disso, é necessário garantir a melhor cobertura da região de segurança com o menor esforço computacional possível.

A proposta de construção de uma malha homogênea de patamares mostrou-se altamente vantajosa em relação ao modelo de construção das RSE tradicional, baseado em direções de transferência de geração radiais, pois a quantidade de patamares pode ser controlada independente do regime de carga do sistema. Essa previsibilidade da quantidade de patamares gerados permite o ajuste do passo de transferência de forma que seja possível gerar uma RSE dentro de uma janela de tempo pré-definida, como ocorre em ambiente de tempo real, considerando os recursos computacionais disponíveis. Outra facilidade que a metodologia propicia é dimensionar os recursos computacionais que serão necessários para que uma certa precisão seja alcançada dentro da janela de tempo pré-definida, a partir de um passo de transferência determinado em estudos.

A metodologia proposta também reduz as zonas de incerteza, inerentes ao processo construtivo utilizado no método tradicional. Os nomogramas apresentam a RSE e seus limites de segurança, mostrando ao operador o quão distante o SEP está de uma condição insegura. No entanto, não são mostradas as localizações dos patamares de geração avaliados. Em um ambiente de operação em tempo real, em caso de necessidade de um redespacho, o ponto de operação pode ser deslocado para dentro de uma grande área de incerteza. A distribuição homogênea dos patamares proporcionada pela metodologia proposta minimiza esse risco na medida em que diminui consideravelmente essas áreas de incerteza.

Outro aspecto importante é a melhor cobertura proporcionada pela metodologia proposta. A deficiência da cobertura proporcionada pelo modelo baseado em direções radiais, onde grandes áreas no espaço de busca de soluções viáveis deixam de ser avaliadas, pode limitar não somente a curva de limite de geração, mas também pode limitar todas as outras curvas limite de segurança que na realidade não estariam violadas. Em um cenário de operação do SEP, em que o ponto de operação atual esteja localizado próximo a esse falso limite de segurança, o nomograma mostra equivocadamente ao operador que o SEP está operando em uma situação muito próxima da insegurança, o que não é necessariamente verdade. Isto ocorre devido à precisão do contorno da região de segurança, que é fortemente afetada pelo número de direções percorridas pelo método tradicional.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

O cálculo do incremento de geração baseado nos limites do espaço de busca, introduz um grande avanço em relação ao cálculo baseado no despacho de geração do ponto de operação atual, permitindo que um mesmo valor percentual para o passo de transferência de geração seja utilizado para qualquer regime de carga. Entretanto, devido à variação da dimensão do espaço de busca em função do regime de carga, é impossível determinar antecipadamente a quantidade de patamares que serão criados. Isso sugere que seria interessante a criação de uma ferramenta de estimação do passo de transferência considerando um número fixo de patamares de geração, de forma que seja possível restringir o esforço computacional à janela de tempo disponível. Esta adequação do passo

de transferência de geração é particularmente importante em um ambiente de sala de controle.

Criação de uma ferramenta de consolidação de resultados adequada à estrutura de dados utilizada pela metodologia proposta. O programa ANAVIS, brevemente citado no Capítulo 4, foi concebido considerando a metodologia baseada em direções de transferência de geração radiais e não é adequado à metodologia proposta.

Finalmente, conforme citado no Capítulo 4, esta implementação da metodologia proposta utiliza apenas seis processos paralelos. No entanto, existe potencial para aumentar o número de processos paralelos envolvidos na criação da malha homogênea de patamares de geração, criando um novo processo a cada nova direção ramificada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, Adriano Lima. “Análise Estática de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência via Nomogramas e Computação Paralela.” Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, SP, 2013.
- ALMEIDA, Felipe de Castro Brum. *Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle e Modelagem de Carga a Partir de Regiões de Segurança Estática*. Dissertação de M.Sc., UFJF, Juiz de Fora, MG, 2011.
- ALVES, Flávio Rodrigo de Miranda. “Ferramenta Integrada para Avaliação da Segurança Estática e Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência de Grande Porte.” *XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Rio de Janeiro, Maio, 2012.
- ANDERSON, P. M., e A. A. FOUAD. “Power System Control and Stability.” IEEE Power Systems Engineering Series, Revised Printing, 1977.
- BARBOSA, LUCAS BITTAR. *Desenvolvimento de uma Ferramenta Automática para a Determinação da Máxima Transferência de Potência entre Áreas/Regiões em Regime Permanente*. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2009.
- BEGOVIC, MM, e AG PHADKE. “Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis.” *IEEE Trans. on Power Systems*. Vol. 7. p.114–123. Fevereiro, 1992.
- CEPEL. “Programa de Análise de Redes / ANAREDE – Manual do Usuário Versão 10.00.01.” Rio de Janeiro, 2013.
- CERTS. “Real-Time Voltage Security Assessment Tool (RTVSA) Functional Specifications.” *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions*. 2007.

- CHAVES, Simone Bezerra. *Análise Estática E Dinâmica De Sistemas De Potência Via Aplicativo Computacional Integrado: Organon*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.
- DJUKANOVIC, M, DJ SOBAJIC, e Y-H PAO. “Learning Tangent Hypersurfaces for Fast Assessment of Transient Stability.” *Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems ANNPS*. p.124–129, 1993.
- DOBSON, I. “Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electrical Power Systems.” *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, p. 240–243, 1992.
- DOLLOFF, PA, et al. “Evaluate Real-time System Reliability Using Boundary-based Concept for EKPC System.” *Proceedings of the 2008 PES General Meeting*. 2008.
- DONG, C, e Y YU. “PDSR in Phase Angle Space and SPM Based Security Monitoring of Power Systems.” *IEEE Region 10*. IEEE, p. 1–5, 2005.
- HENRIQUES, Ricardo M., João A. Passos Filho, Flávio R. de Miranda Alves, Lucas B. Barbosa, Carlos Henrique C. Guimarães, e Felipe de C. B. Almeida. “Desenvolvimento De Uma Ferramenta Automática Para A Determinação Da Máxima.” *XXI SNPTEE S Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica*. Florianópolis, SC. Outubro, 2011.
- HISKENS, IA, e RJ DAVY. “Exploring the Power Flow Solution Space Boundary.” *IEEE Power Engineering Review*. Vol. 16. p. 57, 2001.
- JARDIM, J. L. A. *Manual of ORGANON - User Guide*. Version 1.2, 2006.
- JAYAWEERA, Dilan Supun. “Value of Security Assessment - Extensions and Applications.” Ph.D. dissertation, University of Manchester Institute of Science and Technology, Manchester, 2003.

- KUNDUR, P., et al. "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions." Vol. 19. 2004.
- LEE, ST. "Community Activity Room as a New Tool for Transmission Operation and Planning Under a Competitive Power Market." *Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference*. Vol. 4. 2003.
- LI, P, Y YU, H JIA, J SU, e J ZHAO. "A Study on Boundary of Small Disturbance Stability Region." *Proceedings of International Conference on Power System Technology*. Vol. 2. p. 1228–1232, 2002.
- LIU, Chen-Ching. "A NEW METHOD FOR THE CONSTRUCTION OF MAXIMAL STEADY-STATE SECURITY REGIONS OF POWER SYSTEMS." *IEEE Transactions on Power Systems*. Vols. PWRs-1. 1986.
- MAKAROV, YV, et al. "Wide Area Security Region." Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- MAKAROV, YV, P DU, TB NGUYEN, e S LU. "Wide Area Power System Security Region Intermediate Report." *Pacific Northwest National Laboratory*. 2008.
- MONTICELLI, Alcir J., e Ariovaldo V. GARCIA. *Introdução a sistemas de energia elétrica*. UNICAMP, 2000.
- MONTICELLI, Alcir José. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1983.
- MORISON, Kip, Lei WANG, e Prabha KUNDUR. *Power System Security Assessment*. IEEE Power and Energy Magazine, 2004.
- ONS. "Submódulo 23.3, "Diretrizes e Critérios para estudos elétricos", Procedimentos de Rede." [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br), 2011.
- PASSOS FILHO, João Alberto. "Modelagem e Incorporação dos Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência." Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2000.

- QUADROS, M.A., C.A. SILVA NETO, G. PIRES, e M.S. MOREALE. “Aplicação da Avaliação Dinâmica e Estática do SIN nos Centros de Operação do ONS.” X *EDAO*. São Paulo, SP, 2008.
- REPO, Sami. “On-Line Voltage Stability Assessment of Power System - An Approach of Black-box Modelling.” Tampere University of Technology, Tampere, 2001.
- SANTA ROSA, Arthur da Silva. “Influência da Não Representação de Dispositivos Lentos de Controle nas Análises de Segurança de Tensão.” Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.
- SANTOS, Pedro Henrique Lourenço dos. “Avaliação da Segurança em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Programa Computacional ORGANON.” Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, RJ, 2010.
- SARMIENTO, H., G. PAMPIN, R. BARAJAS, R. CASTELLANOS, G. VILLA, e M. MIRABAL. “Nomograms for Assistance in Voltage Security Visualization.” *Proceeding of IEEE Power System Conference and Exposition*. 2009.
- SILVA NETO, C. A., M. A. QUADROS, M. G. SANTOS, e J. JARDIM. “Brazilian System Operator Online Security Assessment System.” IEEE, Minneapolis, MN, 2010.
- SU, J, et al. “Visualization of Voltage Stability Region of Bulk Power System.” *Proceedings of International Conference on Power System Technology*. Vol. 3. p. 1665–1668, 2002.
- VOURNAS, C. D., G. A. MANOS, J. KABOURIS, G. CHRISTOFORIDIS, G. HASSE, e V. CUTSEM. “On-line Voltage Security Assessment of the Helleni Interconnected System.” *IEEE PowerTech Conference*. Bologna, 2003.
- WOOD, Allen J., e BRUCE F. Wollenberg. *Power Generation, Operation and Control*. Second Edition. John Wiley & Sons, INC., 1996.
- WU, F, e S Kumagai. “Steady-State Security Regions of Power Systems.” IEEE Trans. on Circuits and Systems, p. 703-711, 1982.



YU, Y, Y ZENG, C HUANG, ST LEE, e P ZHANG. “A Practical Direct Method for Determining Dynamic Security Regions of Electrical Power Systems by Power Perturbation Analysis.” *Proceedings of International Conference on Electrical Engineering*. 2004.

YU, Yuan., J. SUN, G. ZHENG, Q. LOU, Y. MIN, e Y. SONG. “On-line Voltage Security Assessment of the Beijing Power System.” *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Third International Conference on*. Nanjuing, 2008.

Zeng, Yuan, e Yixin Yu. *A Practical Direct Method for Determining Dynamic Security Regions of Electrical Power Systems*. p. 1270–1274, 2002.

ZENG, Yuan, Yixin YU, e H JIA. *Theoretical Explanation of Hyper-Plane Boundary of Dynamic Security Region*. p. 1946–1949, 2005.

## APÊNDICE A RESULTADOS DAS EXECUÇÕES DOS TESTES

### A.1 SISTEMA 9 BARRAS

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo de Execução (s)	Patamares
ANAREDE Original 20 Direções	1	1,41	7	1074
	2	2,82	3,8	531
	3	4,23	2,8	356
	4	5,64	2,3	276
	5	7,05	2	223
	6,96	9,81	1,8	166
ANAREDE Original 40 Direções	1	1,41	27,4	2114
	2	2,82	8	1076
	3	4,23	5,8	772
	4	5,64	4,6	560
	5	7,05	3,9	448
	6,96	9,81	3,2	337
Metodologia Proposta	1	1,96	84,8	4558
	2	3,92	14,7	1216
	3	5,88	5,6	571
	4	7,85	3,6	339
	5	9,81	2,8	224

A.2 SISTEMA BRASILEIRO – ONS – DEZEMBRO/2011

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo de Execução (s)	Patamares
ANAREDE Original 20 Direções	1	66	184	378
	2	131	104	201
	3	197	76	140
	3,84	252	68	107
	4	262	63	104
	5	328	56	91
ANAREDE Original 40 Direções	1	66	388	779
	2	131	209	394
	3	197	156	279
	3,84	252	137	220
	4	262	131	208
	5	328	115	182
Metodologia Proposta	1	47	1951	4146
	2	93	520	1082
	3	139	296	488
	4	186	154	299
	5	252	108	197

### A.3 SISTEMA BRASILEIRO – CARGA LEVE

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo de Execução (s)	Patamares
ANAREDE Original 20 Direções	1	27,6	366	1247
	2	55,2	196	631
	3	82,7	139	432
	4	110,3	108	326
	5	137,9	94	267
	15,2	420,0	59	103
ANAREDE Original 40 Direções	1	27,6	744	2500
	2	55,2	370	1267
	3	82,7	270	864
	4	110,3	210	653
	5	137,9	186	536
	15,23	420,0	113	207
Metodologia Proposta	1	84,0	530	2035
	2	168,0	203	550
	3	252,0	116	263
	4	336,0	82	160
	5	420,0	57	110

#### A.4 SISTEMA BRASILEIRO – CARGA MÉDIA

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo de Execução (s)	Patamares
ANAREDE Original 20 Direções	1	55,2	334	486
	2	110,3	196	255
	3	165,5	140	174
	4	220,6	117	136
	4,30	237,0	102	110
	5	275,8	105	110
ANAREDE Original 40 Direções	1	55,2	652	977
	2	110,3	383	508
	3	165,5	281	349
	4	220,6	238	272
	4,30	237,0	211	220
	5	275,8	215	220
Metodologia Proposta	1	47,4	2848	3914
	2	94,8	793	1034
	3	142,3	381	482
	4	190,0	239	292
	5	237,0	174	199

## A.5 SISTEMA BRASILEIRO – CARGA PESADA

Programa	Passo de Transferência (%)	Incremento de Geração (MW)	Tempo de Execução (s)	Patamares
ANAREDE Original 20 Direções	1	65,5	83	119
	1,39	91,0	63	101
	2	131,0	57	80
	3	196,6	48	57
	4	262,1	47	42
	5	327,6	44	36
ANAREDE Original 40 Direções	1	65,5	157	243
	1,39	91,0	137	205
	2	131,0	116	156
	3	196,6	92	116
	4	262,1	92	83
	5	327,6	86	72
Metodologia Proposta	1	18,2	1566	2586
	2	36,4	411	739
	3	54,0	219	358
	4	72,8	130	218
	5	91,0	83	150