

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EMANOEL GECILDO ALBUQUERQUE GARCIA

**GERADOR DE CASOS PARA O SimSEP: UMA
APLICAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA COM
CONTROLE DE REATIVO**

Niterói - RJ

7/2025

EMANOEL GECILDO ALBUQUERQUE GARCIA

**GERADOR DE CASOS PARA O SimSEP: UMA
APLICAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA COM
CONTROLE DE REATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal Fluminense, como requisito
parcial para obtenção do Grau de Engenheiro
Eletricista.

ORIENTADOR

Prof. Dr. Marcio Andre Ribeiro Guimaraes

Niterói - RJ

7/2025

EMANOEL GECILDO ALBUQUERQUE GARCIA

**GERADOR DE CASOS PARA O SimSEP: UMA
APLICAÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA COM
CONTROLE DE REATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal Fluminense, como requisito
parcial para obtenção do Grau de Engenheiro
Eletricista.

Aprovado em ____ de _____ de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcio Andre Ribeiro Guimaraens - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Julio Cesar Stacchini de Souza
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. André da Costa Pinho
Universidade Federal Fluminense - UFF

**Niterói - RJ
7/2025**

RESUMO

Estudos de carga, faltas e estabilidade avaliam tensões, correntes, fluxos e comportamento pós-falhas, fundamentando decisões operacionais e projetos de equipamentos de proteção. Para apoiar esse processo em tempo real, sistemas SCADA coletam dados analógicos e digitais, permitindo confrontar medições reais e simulações. Nesse contexto, o Simulador de Sistemas Elétricos de Potência (SimSEP) foi idealizado como ferramenta educacional em MATLAB que integra módulos de fluxo de potência, inserção de ruídos artificiais para simular as medidas coletadas em campo, e ainda possui um módulo para estimação de estados. Desde sua versão inicial, lançada em 2017, o SimSEP evoluiu com contribuições de alunos que implementaram previsão de carga, alocação ótima de medidores e despacho econômico.

Atualmente, contudo, as funções de fluxo de potência do SimSEP não consideram as restrições de limites de injeção de potência reativa nas barras de geração (barras PV ou de controle de tensão). Essas barras mantêm a tensão em níveis controlados, sendo fundamentais para a estabilidade do sistema. A falta dessas restrições faz com que os modelos se afastem das condições reais de operação, podendo levar a interpretações equivocadas nos estudos de carga.

Para isso, serão desenvolvidos, em Python, simuladores que atendam a dois objetivos principais: (1) resolver o fluxo de potência com controle de tensão por meio da injeção de potência reativa em barras de geração nos sistemas IEEE de 9, 14, 30 e 118 barras, a fim de auxiliar o treinamento dos módulos de fluxo de potência do SimSEP em MATLAB; e (2) determinar os limites operativos das máquinas geradoras de reativo em função das variações de carga ativa ao longo das barras de carga nesses mesmos sistemas - gerando diversos casos ou situações de fronteira a qual poderão ser devidamente integrados ao supervisório do SimSEP.

Palavras-chave: Fluxo de Potência; Método completo de Newton; Controle de Tensão por Injeção de Potência; Curvas PV.

ABSTRACT

Load flow, fault, and stability studies evaluate voltages, currents, power flows, and post-fault behavior, serving as the basis for operational decisions and the design of protection equipment. To support this process in real time, SCADA systems collect analog and digital data, allowing comparisons between actual measurements and simulations. In this context, the Power System Simulator (SimSEP) was designed as an educational tool in MATLAB that integrates power flow modules, artificial noise insertion to simulate field-collected measurements, and also includes a state estimation module. Since its initial version, launched in 2017, SimSEP has evolved through student contributions, who implemented load forecasting, optimal meter placement, and economic dispatch.

Currently, however, SimSEP's power flow functions do not consider the reactive power injection limits at generation buses (PV or voltage control buses). These buses maintain voltage levels within controlled limits and are fundamental to system stability. The absence of these constraints causes the models to deviate from actual operating conditions, potentially leading to misinterpretations in load studies.

To address this, Python-based simulators will be developed to meet two main objectives: (1) to solve the power flow considering voltage control through reactive power injection at generation buses in the IEEE 9, 14, 30, and 118-bus systems, in order to support the training of the MATLAB-based power flow modules of SimSEP; and (2) to determine the operating limits of reactive power generating units as a function of active load variations across the load buses in these same systems — generating multiple cases or boundary situations that may be properly integrated into the SimSEP supervisory system.

Keywords: Power Flow; Full Newton Method; Voltage Control by Power Injection;
PV Curves.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço, primeiramente, a Deus, que me deu muita força e esperança para lutar até o fim. Em segundo lugar, sou muito grato ao meu orientador, Márcio Guimarães, que me ajudou a enxergar de forma diferente e de forma mais astuta em vários momentos durante a execução deste trabalho. Em terceiro lugar, mas não menos importante, agradeço imensamente a toda minha família, que a todo momento torceu por mim, me deu suporte e esteve comigo nessas batalhas até aqui travadas. Quando menciono “família”, sou generalista: começo pelo meu noivo e companheiro, Paulo Júnior, que, diga-se de passagem, deixou sua belíssima contribuição — como analista de sistemas, ajudou-me na elaboração das interfaces gráficas. Também agradeço aos meus pais e às minhas irmãs por nunca me deixarem sozinho, mesmo eu estando a mais de 500 km de distância. Por fim, agradeço a todos os meus amigos e amigas, engenheiros e engenheiras, que um dia foram meu ombro para me apoiar e me alavancar. A todos, muito obrigado, e tenham boa leitura!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Unifilar de um SEP geral	11
Figura 2 - Mapa de linhas de transmissão – Rio Grande do Sul	12
Figura 3: Modelo Generalizado de um centro de controle de um SEP	15
Figura 4: Modelo Generalizado da Versão 0 do SimSEP - Jackson Moura.....	16
Figura 5: Modelo Generalizado da Versão 1 do SimSEP	18
Figura 6: Modelo Específico da Versão 0 do SimSEP - Jackson Moura	20
Figura 7: Modelo Específico da Versão 1 do SimSEP	22
Figura 8: Diagrama de fasores e sua correspondência com a forma de onda senoidal.....	24
Figura 9: Modelo de Linha Equivalente.....	31
Figura 10: Modelo de Transformador em Fase	32
Figura 11: Modelos de Reatâncias Shunts de Barra.....	33
Figura 12: “Lei dos Nós” de Kirchoff	35
Figura 13: Fluxograma Geral GoSimul - Generator of Simulations	54
Figura 14: Diagrama Unifilar - Exemplo de aplicação do GoSimul	54
Figura 15: Legenda de Típicos para Tabelas de Dados.....	55
Figura 16: Módulos de leitura inicial	56
Figura 17: Inicialização das Matrizes do Sistema	56
Figura 18: Atualização das matrizes do sistema - matrizSystem	57
Figura 19: Atualização das matrizes do sistema - matrizSystem2	57
Figura 20: Módulos de modelagem de rede	58
Figura 21: Principais Características de Barra.	58
Figura 22: Principais Características de Barra - Atualizações relevantes	59
Figura 23: <i>Módulos para a determinação</i> da Matriz de Admitâncias.....	60
Figura 24: Principais Características de Linha	61
Figura 25: Lista Auxiliar para a Matriz de Admitâncias	61
Figura 26: Matriz de Admitâncias - Sistema 3 barras genérico	61
Figura 27: Principais variáveis inicializadas para o Fluxo de Potência.....	62
Figura 28: Módulos para a determinação do Fluxo de Potência	63
Figura 29: Extração de Tensão e Angulo do vetor de correções	64
Figura 30: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 9 Barras.....	71
Figura 31: GoS - Evolução dos ângulos das barras do sistema IEEE 9 Barras	71
Figura 32: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 14 Barras	73
Figura 33: GoS - Evolução dos ângulos das barras do sistema IEEE 14 Barras	73
Figura 34: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 30 - Barras PV	77
Figura 35: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 30 - Barras PQ	77
Figura 36: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 30 - Barras Violadas	78
Figura 37: GoS - Evolução dos ângulos das barras do sistema IEEE 30 Barras	78
Figura 38: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 118 - Barras PV	85
Figura 39: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 118 - Barras PQ	85
Figura 40: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 118 - Barras Violadas	86
Figura 41: GoS - Evolução dos ângulos das barras do sistema IEEE 118 Barras	86
Figura 42: Fluxograma Geral GoCases - Generator of Cases	87
Figura 43: GoCases - Listas de principais parâmetros internos - exemplo IEEE 14 Barras	89
Figura 44: GoCases - Principais listas após Análise Combinatória - exemplo IEEE 14.....	90
Figura 45: GoCases - Seleção dos pontos de fronteira – exemplo IEEE 14.....	91
Figura 46: GoCases - Determinação dos pontos de fronteira - exemplo IEEE 14	92
Figura 47: GoCases - Pontos de fronteiras detectados - exemplo IEEE 14.....	92
Figura 48: GoCases - Resultado do exemplo com IEEE 14 – Análise Gráfica.....	94
Figura 49: GoCases - Resultado do estudo com IEEE 9 – Análise Gráfica.....	97

Figura 50: GoCases - Resultado do estudo com IEEE 14 – Análise Gráfica	99
Figura 51: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Gráfica (Barras de 1-10)	101
Figura 52: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Gráfica (Barras de 10-20)	101
Figura 53: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Gráfica (Barras de 20-30)	101
Figura 54: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 1-8)	103
Figura 55: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 8-16)	104
Figura 56: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 16-24)	104
Figura 57: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 24-32)	105
Figura 58: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 32-40)	105
Figura 59: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 40-48)	105
Figura 60: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 48-56)	106
Figura 61: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 56-64)	106
Figura 62: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 64-72)	106
Figura 63: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 72-80)	107
Figura 64: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 80-88)	107
Figura 65: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 88-96)	107
Figura 66: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 96-104)	108
Figura 67: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 104-112)	108
Figura 68: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 112-118)	108
Figura 69: Fluxograma Geral GoCurvs - Generator of Curves	112
Figura 70: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: todas as barras	117
Figura 71: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: barras críticas	118
Figura 72: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: teste T10	118
Figura 73: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: teste T11	119
Figura 74: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: teste T20	120
Figura 75: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: teste T21	120
Figura 76: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: teste T30	120
Figura 77: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: teste T31	121
Figura 78: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: teste T32	121
Figura 79: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: todas as barras	125
Figura 80: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: barras críticas	126
Figura 81: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T10	126
Figura 82: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T11	127
Figura 83: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T12	127
Figura 84: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T20	128
Figura 85: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T21	128
Figura 86: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T31	129
Figura 87: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T32	129
Figura 88: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T33	129
Figura 89: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T34	129
Figura 90: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: teste T35	130
Figura 91: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 Barras – barras PV	132
Figura 92: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 Barras – barras PQ	133
Figura 93: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 Barras – barras criticas	133
Figura 94: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 Barras – barras PV	134
Figura 95: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 Barras – barras PQ	134
Figura 96: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 Barras – todas as barras	134
Figura 97: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 Barras – todas as barras	135
Figura 98: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PV	137
Figura 99: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PQ	137
Figura 100: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras críticas	138
Figura 101: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PV	138
Figura 102: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PQ	138

Figura 103: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PV	139
Figura 104: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PQ	139
Figura 105: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PV	140
Figura 106: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 Barras – barras PQ	140
Figura 107: Exemplo de comportamento das Tensões na Divergência Numérica	141
Figura 108: Tensões na Divergência de identificação - Sem lógica suplementar	142
Figura 109: Tensões na Divergência de identificação - lógica suplementar 1	143
Figura 110: TELA 1 - GoSimul - Principal.....	144
Figura 111: TELA 2 - GoCases - Principal.....	144
Figura 112: TELA 3 - GoCurvs - Principal.....	145
Figura 113: TELA 1 - GoSimul - Resultado "Executar Estudo" - Exemplo IEEE 9 Barras	147
Figura 114: TELA 1 - GoSimul - Tela de seleção de Tipo de arquivo	149
Figura 115: TELA 1 - GoSimul - Tela de seleção de seleção de gráfico CSV	149
Figura 116: GoSimul - Matriz Y - Exemplo IEEE 9 Barras	150
Figura 117: GoSimul - Jacobiana Inicial - Exemplo IEEE 9 Barras	150
Figura 118: GoSimul - Jacobiana Final - Exemplo IEEE 9 Barras	151
Figura 119: GoCases - Resultado "Executar Estudo" - Exemplo IEEE 9 Barras.....	152
Figura 120: TELA 2 - GoCases - Casos Salvos	153
Figura 121: TELA 2 - GoCases - Casos Salvos para gráfico	154
Figura 122: TELA 3 - GoCurvs - Exemplo IEEE 9 Barras.....	155
Figura 123: TELA 3 - GoCurvs - Exemplo IEEE 9 Barras.....	155
Figura 124: TELA 3 - GoCurvs - Casos Salvos para gráfico.....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de barras em modelagem de SEP	39
Tabela 2: Especificações dos parâmetros de entrada para o caso 3 barras	59
Tabela 3: Configurações do TAP dos Transformadores.	61
Tabela 4: GoSimul - Resumo das características dos estudos que podem ser realizados	68
Tabela 5: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 9 Barras.....	70
Tabela 6: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 9 Barras.....	70
Tabela 7: GoSimul - Resultados de Geração para IEEE 9 Barras.....	71
Tabela 8: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 14 Barras.....	72
Tabela 9: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 14 Barras.....	72
Tabela 10: GoSimul - Resultados de Geração para IEEE 14 Barras.....	73
Tabela 11: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 30 Barras.....	74
Tabela 12: Testes para decisão dos parâmetros mais adequados ao IEEE 30 Barras.....	75
Tabela 13: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 30 Barras.....	76
Tabela 14: Resultados de Geração para IEEE 30 Barras.....	76
Tabela 15: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 118 Barras.....	79
Tabela 16: Testes para decisão dos parâmetros mais adequados ao IEEE 118 Barras.....	80
Tabela 17: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 118 Barras.....	81
Tabela 18: GoSimul - Resultados de Geração para IEEE 118 Barras.....	83
Tabela 19: GoCases - Configuração exemplar para IEEE 14 Barras	89
Tabela 20: GoCases - Resumo das características dos estudos que podem ser realizados.....	93
Tabela 21: GoCases - Resultado do exemplo com IEEE 14 – Análise Tabular: regime pesado.	95
Tabela 22: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 9 Barras.....	97
Tabela 23: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 9	97
Tabela 24: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 9	97
Tabela 25: Resultado do estudo com IEEE 9 Barras – Análise Tabular: regime leve	98
Tabela 26: Resultado do estudo com IEEE 9 Barras – Análise Tabular: regime pesado	98
Tabela 27: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 14 Barras.....	98
Tabela 28: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 14	98
Tabela 29: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 14.....	99
Tabela 30: Resultado do estudo com IEEE 14 Barras – Análise Tabular: regime leve	99
Tabela 31: Resultado do estudo com IEEE 14 Barras – Análise Tabular: regime pesado	99
Tabela 32: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 30.....	100
Tabela 33: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 30	100
Tabela 34: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 30.....	101
Tabela 35: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Tabular: regime leve.....	102
Tabela 36: Resultado do estudo com IEEE 30 Barras – Análise Tabular: regime pesado	102
Tabela 37: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 118	102
Tabela 38: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 118	103
Tabela 39: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 118.....	109
Tabela 40: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Tabular: regime leve.....	109
Tabela 41: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Tabular: regime pesado	110
Tabela 42: GoCurvs - Resumo das características dos estudos que podem ser realizados	115
Tabela 43: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 9 – Características Gerais	116
Tabela 44: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 9 – Características alteradas	116
Tabela 45: GoCurvs – Maiores Quedas de Tensões Detectadas - IEEE 9 Barras	122
Tabela 46: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 14 – Características Gerais	124
Tabela 47: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 14 – Características alteradas.....	125
Tabela 48: GoCurvs – Maiores Quedas de Tensões Detectadas - IEEE 14 Barras	131
Tabela 49: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 30 – Características Gerais	132

Tabela 50: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 30 – Características alteradas	132
Tabela 51: Maiores Quedas de Tensões Detectadas - IEEE 30 Barras	135
Tabela 52: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 118 – Características Gerais	136
Tabela 53: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 118 – Características alteradas	136

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo	19
2. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO	19
2.1 Versão 0	19
2.2 Versão 1	21
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1 Considerações Iniciais	22
3.2 Definições Gerais.....	24
3.3 Por Unidade - PU.....	29
3.4 Modelagem dos Equipamentos de Rede.....	31
3.4.1 Modelagem de Linha	31
3.4.2 Modelagem de Transformador em fase	32
3.4.3 Modelagem de Reatâncias <i>Shunt</i>	33
3.4.4 Matriz de Admitâncias – Matriz Y	34
3.5 Equacionamento do Power Flow	37
3.6 Soluções do <i>Power Flow</i>	41
3.6.1 Consideração Inicial	41
3.6.2 Jacobiana do Power Flow	44
3.6.3 Apresentação ao algoritmo do Power Flow.....	48
3.7 Controle de Tensão por Injeção de Potência Reativa	49
3.7.1 Consideração Inicial	49
3.7.2 Apresentação ao algoritmo	50
3.7.3 Mudanças impostas pelo controle.....	52
4. <i>GoSimul – GENERATOR OF SIMULATIONS</i>	53
4.1 Considerações Iniciais	53
4.2 Leitura e Adaptação de Dados	55
4.3 Modelagem de Rede	57
4.3.1 Considerações Iniciais	57
4.3.2 Matriz de Admitâncias – Matriz Y	59
4.3.3 Fluxo de Potência com Controle de Tensão	62
4.4 Analisador Final.....	68
4.4.1 Considerações Iniciais	68

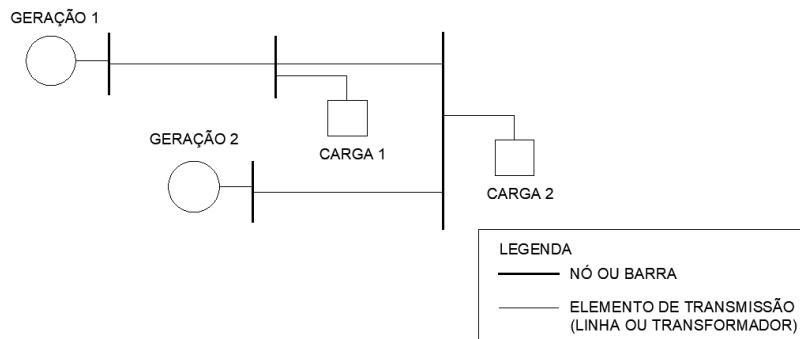
4.4.2 Resultados do GoSimul - IEEE 9 Barras	69
4.4.3 Resultados do GoSimul - IEEE 14 Barras	72
4.4.4 Resultados do GoSimul - IEEE 30 Barras	74
4.4.5 Resultados do GoSimul - IEEE 118 Barras	78
5. <i>GoCases – GENERATOR OF CASES</i>	86
5.1 Considerações Iniciais	86
5.2 Cálculos	88
5.3 Analisador Final.....	93
5.3.1 Considerações Iniciais	93
5.3.2 Resultados do GoCases - IEEE 9 Barras	96
5.3.3 Resultados do GoCases - IEEE 14 Barras	98
5.3.4 Resultados do GoCases - IEEE 30 Barras	100
5.3.5 Resultados do GoCases - IEEE 118 Barras	102
6. <i>GoCurvs – GENERATOR OF CURVES</i>	110
6.1 Considerações Iniciais	110
6.2 Cálculos	112
6.3 Analisador Final.....	114
6.3.1 Considerações Iniciais	114
6.3.2 Resultados do GoCurvs - IEEE 9 Barras	116
6.3.3 Resultados do GoCurvs - IEEE 14 Barras	124
6.3.4 Resultados do GoCurvs - IEEE 30 Barras	131
6.3.5 Resultados do GoCurvs - IEEE 118 Barras	135
6.4 Considerações Finais	140
6.4.1 Divergência numérica	140
6.4.1 Divergência de identificação ou mal convergido	141
7. INTERFACE GRÁFICA	143
7.1 Considerações Iniciais	143
7.2 TELA 1 – GoSimul.....	147
7.3 TELA 2 – GoCases	151
7.4 TELA 3 – GoCurvs.....	154
7.5 Bibliotecas Utilizadas	158
7.5.1 Bibliotecas Nativas do Python.....	159
7.5.2 Bibliotecas Externas	159
8. CONCLUSÃO	160
8.1 Considerações Iniciais	160
8.1 Pontos Fortes e Fracos dos Simuladores	161

8.1.1 TELA 1 - GoSimul	161
8.1.2 TELA 2 - GoCases.....	162
8.1.3 TELA 3 - GoCurvs	162
8.2 Premissas e Escolha dos Parâmetros	163
8.3 Trabalhos Futuros	163
Referências	164
Apêndice A – Arquivos CDF	166
A.1 Arquivo ieee9_Marcelo.cdf	167
A.2 Arquivo ieee14.cdf.....	169
A.3 Trecho inicial do arquivo ieee30.cdf	171
A.4 Trecho inicial do arquivo ieee118.cdf	172
Apêndice B – Lista de algoritmos	174

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é tradicionalmente dividido em três componentes principais: geração, transmissão e distribuição. A geração é responsável pela produção de energia elétrica a partir de alguma fonte conhecida; a transmissão, pelo transporte dessa energia dos centros de produção aos centros de consumo; e a distribuição, pela entrega da energia elétrica aos consumidores finais doravante chamadas apenas de cargas. Há diferentes maneiras de representação de um sistema elétrico de potência como a representação em diagramas unifilares (Figura 1), diagramas trifilares, mapas geográficos ou por meio de tabelas. Cada tipo de representação é utilizado dependendo do propósito e do nível de detalhamento necessário para a análise ou operação em questão, a figura a seguir é um exemplo de diagrama unifilar representativo de um SEP genérico.

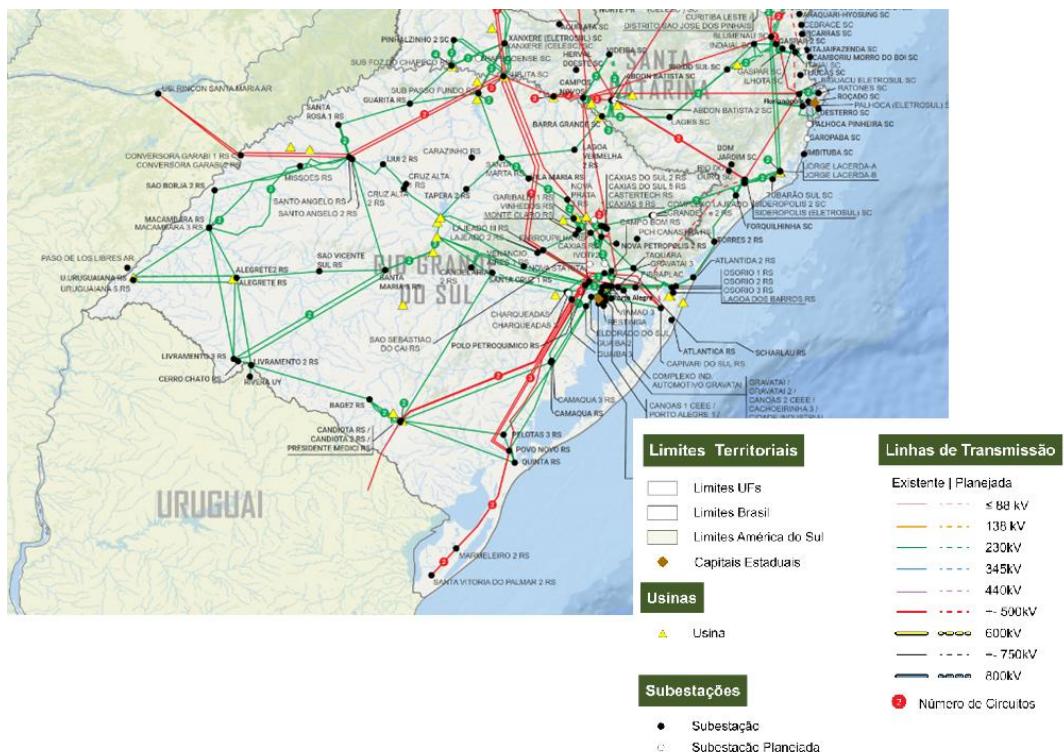
Figura 1: Diagrama Unifilar de um SEP geral.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os SEP podem ser tão pequenos quanto minigerações ou tão grandes quanto um país - no Brasil por exemplo o SEP mais conhecido é o Sistema Interligado Nacional (SIN) - um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. A Figura 2 é um exemplo de um mapa geográfico de transmissão elétrica do SIN no Rio Grande do Sul. O mapa completo pode ser consultado no site da ONS [1].

Figura 2 - Mapa de linhas de transmissão – Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de ONS, 2014 [1].

O planejamento da operação, da manutenção, de melhorias e expansões do SEP requer uma série de estudos e simulações como estudos de carga, estudos de faltas, estudos de estabilidade, dentre outros.

- Estudos de carga:** está associado a determinação das tensões, das correntes, dos fluxos de potências ativas e reativas numa variedade de pontos do sistema elétrico sobre determinadas condições de operação normal ou em regime permanente [2]. Por operação normal, entende-se que as grandezas estão a níveis de projeto, portanto controláveis pela operação. É o estudo que fornece as condições iniciais de para vários outros estudos elétricos, como os estudos de falta ou até mesmo os estudos de estabilidade.
- Estudos de Faltas:** consiste em observar as grandezas elétricas (tensão, frequência, corrente, potências, defasagem angular, dentre outras) após a ocorrência de algum incidente com os condutores - um curto-círcuito ou uma

abertura, por exemplo. Os valores das grandezas elétricas após uma falta geralmente ficam muito aquém do especificado, propriedade que em particular é aproveitada por outros estudos como nos estudos de proteção, por exemplo, auxiliando na especificação de equipamentos correlacionados - como disjuntores, transformadores de potência (TP) e de corrente (TC).

- **Estudos de Estabilidade:** de acordo com o Kundur [3], estabilidade é definido como a propriedade do sistema elétrico restaurar o estado de equilíbrio sobre condições normais de operação após aplicação de distúrbios transitentes no sistema. Os distúrbios podem ser causados por fenômenos de diferentes naturezas, por exemplo, pode ser causado por uma falta, por um aumento de carga, uma descarga atmosférica, um chaveamento de uma grande máquina síncrona, dentre outras e podem ter diferentes classificações como o tamanho do distúrbio ou ainda a natureza física do resultado da instabilidade.

A responsável pelo gerenciamento e realização dos estudos elétricos do SIN é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que por meio de seus algoritmos e colaboradores monitoram ininterruptamente o sistema elétrico nacional. Algumas dessas principais ferramentas computacionais¹ há mais de duas décadas de análise destacam-se as aplicações desenvolvidas pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) tal como o ANAREDE. É constituído por dez programas computacionais desenvolvidos para realização dos estudos de carga em regime permanente como os estudos de fluxo de potência. Assim sendo, faz parte inicialmente de diversas outras simulações - tais como os estudos de falta, pelo ANAFAS, ou modelagens do comportamento dinâmico, pelo ANATEM. Esses e outros, são excelentes aplicações para simulação de eventos nos sistemas elétricos e seu comportamento frente a variações.

Apesar da robustez das simulações obtidas pelas aplicações descritas acima, diante da crescente demanda por segurança energética, é imprescindível garantir também a observação do sistema em tempo real. Quando os dados disponíveis permitem a comparação de grandezas elétricas obtidas a partir de fontes distintas e submetidas a diferentes processos de tratamento, a identificação e depuração de possíveis erros tornam-se significativamente mais eficazes.

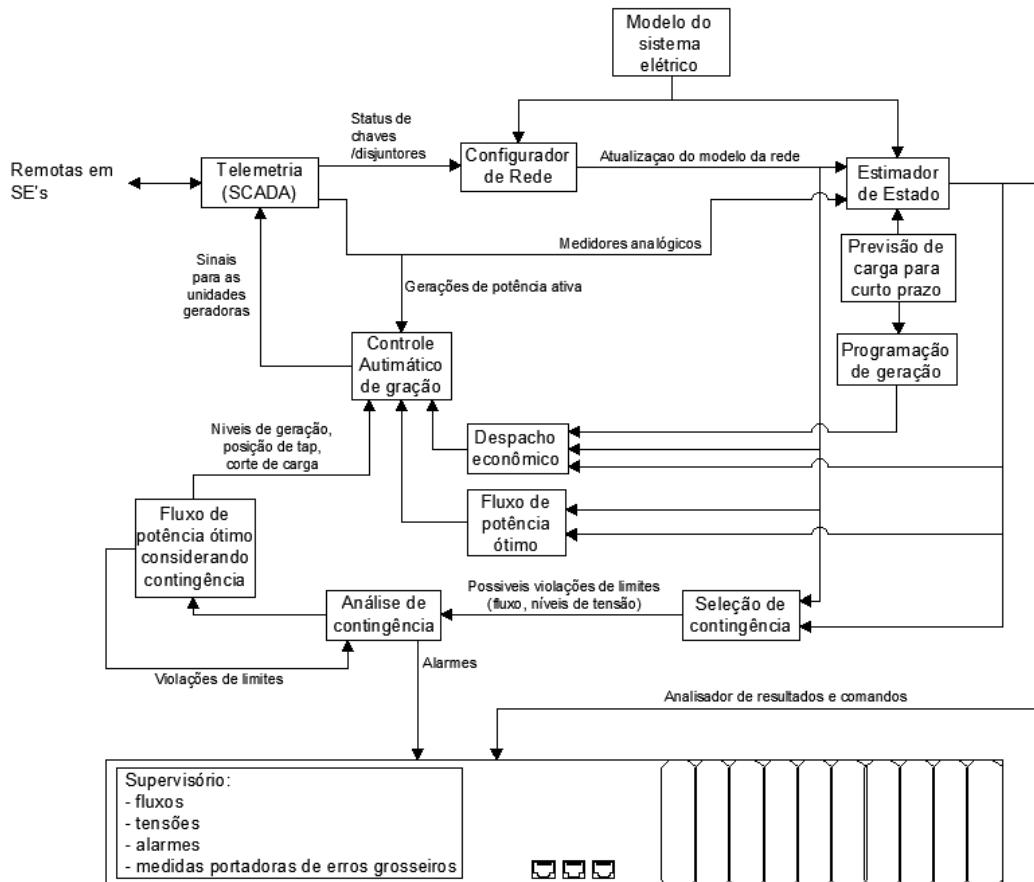
O desenvolvimento de sistemas supervisórios de controle e aquisição de dados, também conhecidos como sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) surgem nesse contexto com suas diversas metodologias para telemetria (aquisição de dados por medidas), processamento e armazenagem de dados. Desta forma, os dados obtidos pelas simulações com modelos matemáticos e algoritmos computacionais podem ser confrontados a partir as informações obtidas pelo sistema supervisório possibilitando o uso de outras ferramentas de análise, Estimação de Estados por exemplo, tornando tomadas de decisão mais rápidas e precisas. A ONS, por exemplo, com a finalidade de ampliar a segurança elétrica no atendimento às cidades-sede dos joGoSimul, durante a copa do mundo FIFA 2014, estabeleceu medidas preventivas que exigiram um regime especial de operação do SIN. O supervisório REGER foi a rede de Gerenciamento de Energia desenvolvida para a supervisão em tempo real nos cinco Centros de Operação do ONS em 2014 [1].

A é um exemplo idealizado de diagrama esquemático que mostra o fluxo de informações entre as várias funções a serem realizadas em um sistema genérico de computador de um centro de controle de operações de um Sistema Elétrico de Potência.

A operação de um SEP tem início com o armazenamento das informações coletadas em campo por meio de sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Esses dados podem ser classificados em duas categorias principais: analógicos e digitais. Os dados analógicos englobam grandezas elétricas contínuas, como tensões, correntes, potências ativas e reativas de cargas e gerações, bem como fluxos de potência nas linhas de transmissão. Por outro lado, os dados digitais referem-se a informações discretas, como o estado (aberto ou fechado) de disjuntores e chaves em linhas, unidades geradoras e cargas, além das posições dos transformadores com TAP variável, entre outros. Após a coleta, os dados são armazenados e encaminhados a um módulo denominado configurador de rede. Esse módulo tem a função essencial de realizar a configuração digital do sistema elétrico e de construir a matriz de admitâncias, a qual é derivada dos modelos elétricos dos componentes do sistema. Ressalta-se que essa matriz é fortemente dependente da topologia da rede, aspecto que será abordado em maior profundidade em seções posteriores. Com a rede devidamente configurada e os dados estruturados, as informações estão, então, preparadas para serem utilizadas nos

módulos subsequentes de análise, nos quais as grandezas elétricas serão estudadas sob diversas perspectivas operacionais e analíticas.

Figura 3: Modelo Generalizado de um centro de controle de um SEP.



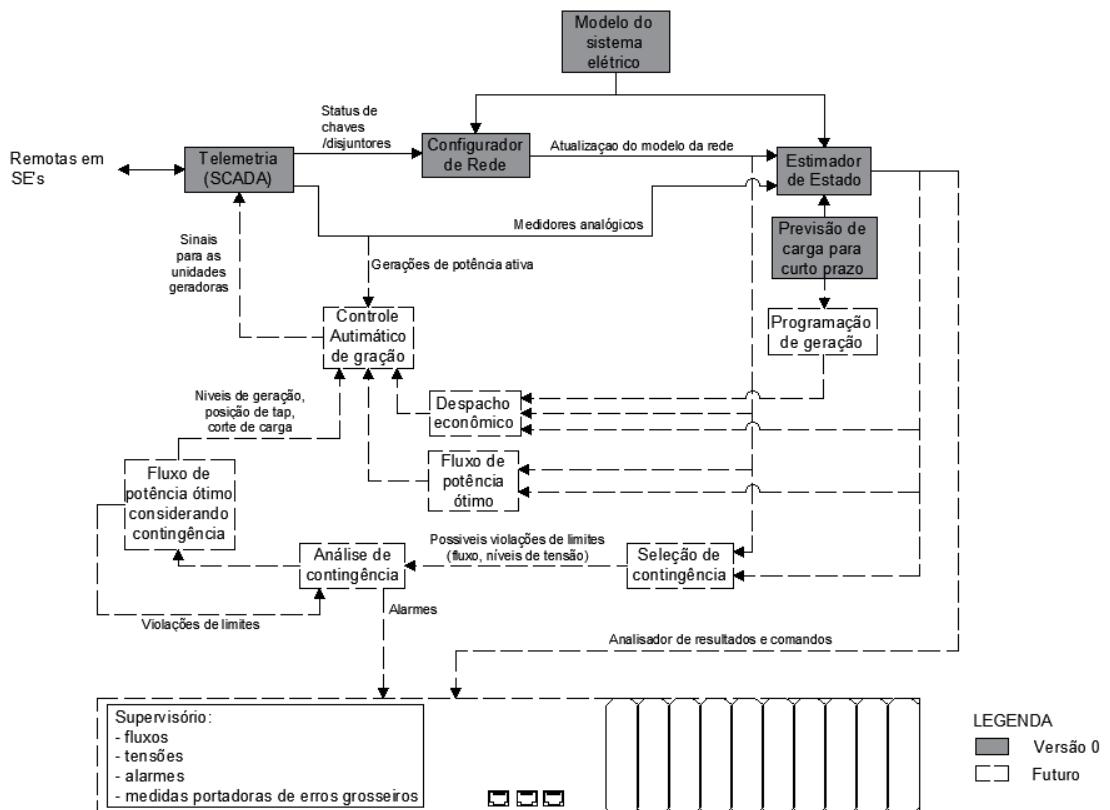
Fonte: Adaptado de WOOD et al., 2014 [4].

Idealizado pelo professor Márcio Guimaraens do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Fluminense (UFF), o Simulador de Sistemas Elétricos de Potência – SimSEP, vem sendo desenvolvido no MATLAB R2010a com o objetivo de criar uma ferramenta que permita as análises da operação sistemática de redes elétricas [5]. Essa ferramenta visa então simular o comportamento de um SEP e para isto ela deverá incluir diversos módulos, independes ou não, que são pertinentes para análises de dados elétricos, tais como os módulos apresentados pela Figura 3. O SimSEP pretende-se ser uma ferramenta capaz de servir como suporte pedagógico para as disciplinas finais do curso de Engenharia Elétrica na UFF.

A versão 0 do SimSEP foi lançada em 2017 pelo aluno Jackson Moura na sua monografia de conclusão de curso [5]. De início ele propôs em seu trabalho algumas

modelagens do sistema elétrico. De posse das modelagens ele resolveu o problema do fluxo de potência para determinar todas as principais grandezas do sistema e armazenou uma base de parâmetros elétricos como tensão, ângulo, correntes, fluxos de potência de cada barra e elemento de transmissão; Então ele prosseguiu com um tratamento dos dados de modo a mascará-los como se fossem medidas feitas pelo supervisório por meio de introdução de ruídos; Por último ele acrescentou o bloco de estimação de Estados que, dentre outras funcionalidades, pode detectar erros de grosseiras nas medidas possibilitando aos operadores uma rápida ação de depuração do erro. A Figura 4 representa e sintetiza os blocos inicialmente estruturados na versão 0 do SimSEP. Entretanto, o módulo de resolução do fluxo de potência proposto inicialmente não se propõe realizar a validação dos limites operativos das máquinas.

Figura 4: Modelo Generalizado da Versão 0 do SimSEP - Jackson Moura



Fonte: Adaptado de WOOD et al., 2014 [4].

Os blocos representados correspondem a diferentes estudos analíticos o qual os dados podem ser utilizados de forma integrada em outras análises ou, alternativamente, servir como subsídios para decisões automáticas do sistema

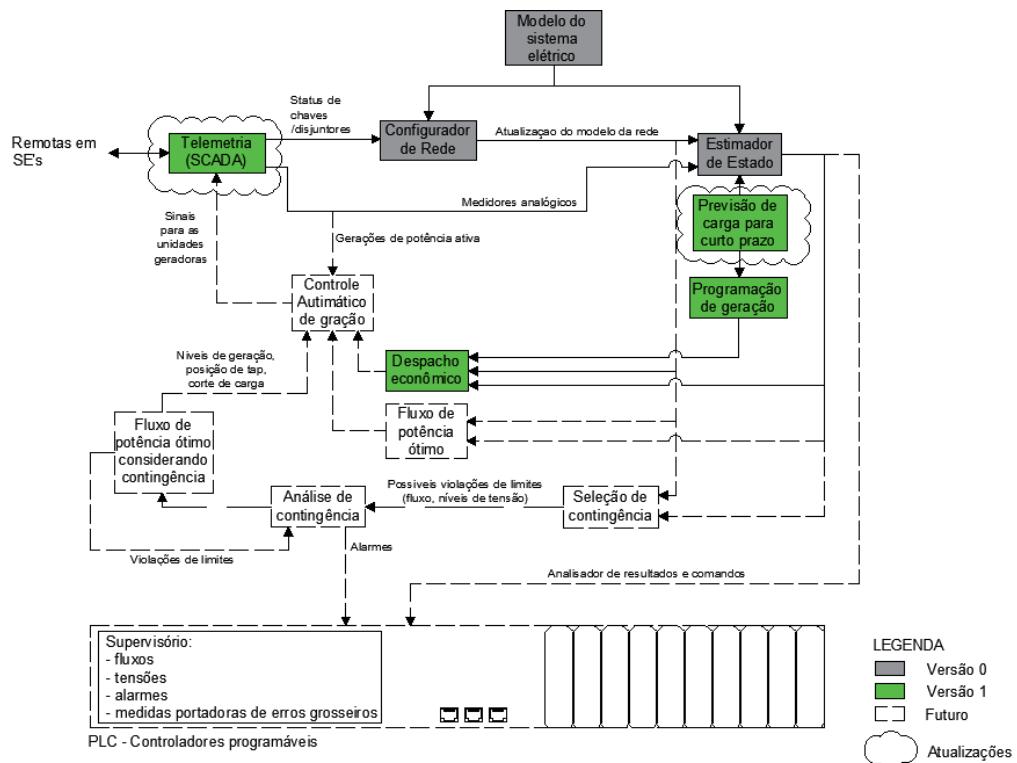
supervisório por meio de ações de controladores. Por exemplo, previsão de carga de curto prazo além de oferecer uma contextualização temporal do comportamento do SimSEP, possui papel fundamental na programação da geração e na resolução do problema de despacho econômico – que por sua vez tem como principal objetivo a determinação da potência a ser despachada por cada usina, assegurando o equilíbrio entre geração, carga e perdas na transmissão, com foco na otimização dos custos operacionais do sistema elétrico. Cada um desses diferentes estudos deverá embasar decisões manuais ou automáticas tais como o corte seletivo de carga, a reconfiguração da geração, da topologia da rede, auxiliar em programas de manutenções corretivas ou preventivas em equipamentos, e outras medidas que contribuem pra a operação segura, eficiente e confiável do sistema elétrico de potência.

Deste a versão 0 novos blocos vieram sendo construídos pelos alunos do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFF de modo que uma nova versão precisou ser consolidada em uma nova versão. Os alunos Igor e Ayres deram importantes contribuições nos blocos inicialmente pensado na versão 0 pelo aluno Jackson. O trabalho do Igor visou a implementação do bloco de previsão de carga [6]. Já o trabalho do Ayres focou na alocação de medidores na rede para obtenção ótima de valores simulados [7]. Ambos então atualizaram os blocos do SimSEP, como pode ser observado na Figura 5. Posteriormente, contribuições foram feitas em colaboração entre aluno Raphael Bottino e o professor Márcio Guimarães para o desenvolvimento do módulo de despacho econômico e programação de geração. Então o SimSEP é atualizado para sua versão 1 a qual se encontra até hoje - todos os blocos futuros como os blocos de Fluxo de Potência Ótimo (FPO), FPO considerando contingências, Controle Automático da Geração (CGA) e um supervisório ainda não foram desenvolvidos.

Blocos ainda não implementados podem fornecer ainda mais robustez ao estudo emulando mais possibilidades de trabalho com as grandezas elétricas - variáveis de estado). FPO e FPO com análise de contingências, por exemplo trazem o problema de despacho econômico junto com os problemas de determinação de estado das variáveis e grandezas elétricas de modo a considerar limitações dos componentes envoltos na transmissão, na geração e na carga. Trata-se, portanto, de um problema de otimização que, assim os módulos de Despacho Econômico, visa simular e obter todas as informações para o perfeito funcionamento do sistema diante de alguns critérios

desejáveis. Enquanto FPO se caracteriza mais como bloco de análises, o CGA e o Supervisório já são blocos de controle. São neles que serão tomadas as decisões (seja ela automática ou não). Por exemplo, enquanto os controles do CGA definem automaticamente quais geração entram ou saem em determinados horários, o controlador, visualizando o supervisório, pode tomar a decisão manual de comandar outras unidades geradoras.

Figura 5: Modelo Generalizado da Versão 1 do SimSEP



Fonte: Adaptado de WOOD et al., 2014 [4].

Diferentemente de Despacho Econômico, a FPO é uma ferramenta mais abrangente capaz de otimizar outros parâmetros que não só parâmetros econômicos, tal como otimização de perdas nas linhas de transmissão ou a manutenção da tensão a um parâmetro fixo em barras selecionadas (barras de controle de tensão). É o suprassumo de todas as ferramentas computacionais para análises elétricas que reúne as características mais fortes de cada parte.

Os blocos apresentados são meramente orientativos e não abrangem todas as ferramentas utilizadas nos cálculos. Cada bloco pode ser compreendido como um

conjunto de funções (sub-blocos) que podem ser aplicados em outros blocos, ou seja, podem ser reutilizadas conforme necessário.

Atualmente as funções capazes de calcular o Fluxo de Potência do SimSEP não considera as restrições de limites de injeção de Potência Reativa nas barras de geração - também conhecidas como barras PV ou ainda barras de controle de tensão. Essas barras possuem a característica de manter a tensão em níveis controlados, o que as torna fundamentais para a estabilidade do sistema. A inclusão desses limites é essencial para aproximar a modelagem do sistema às condições reais - uma vez que todas as fontes de energia apresentam limitações reais e para evitar interpretações equivocadas nos estudos de carga.

1.1 Objetivo

Utilizando-se dos sistemas elétricos de potência exemplares IEEE 9, 14, 30 e 118 barras, o presente trabalho, tem como objetivos:

- Desenvolver em Python um simulador capaz de solucionar o Fluxo de Potência com controle de tensão por injeção de Potência Reativa em barras de geração para os quatro sistemas IEEE exemplares de modo a auxiliar o treinamento dos códigos GoSimul dos módulos do Fluxo de Potência do SimSEP em MATLAB.
- Desenvolver, em Python, simuladores capazes de auxiliar na obtenção dos limites operativos das máquinas geradoras de reativo por variações de carga ativa ao longo das barras de carga nos quatro sistemas exemplos da IEEE.

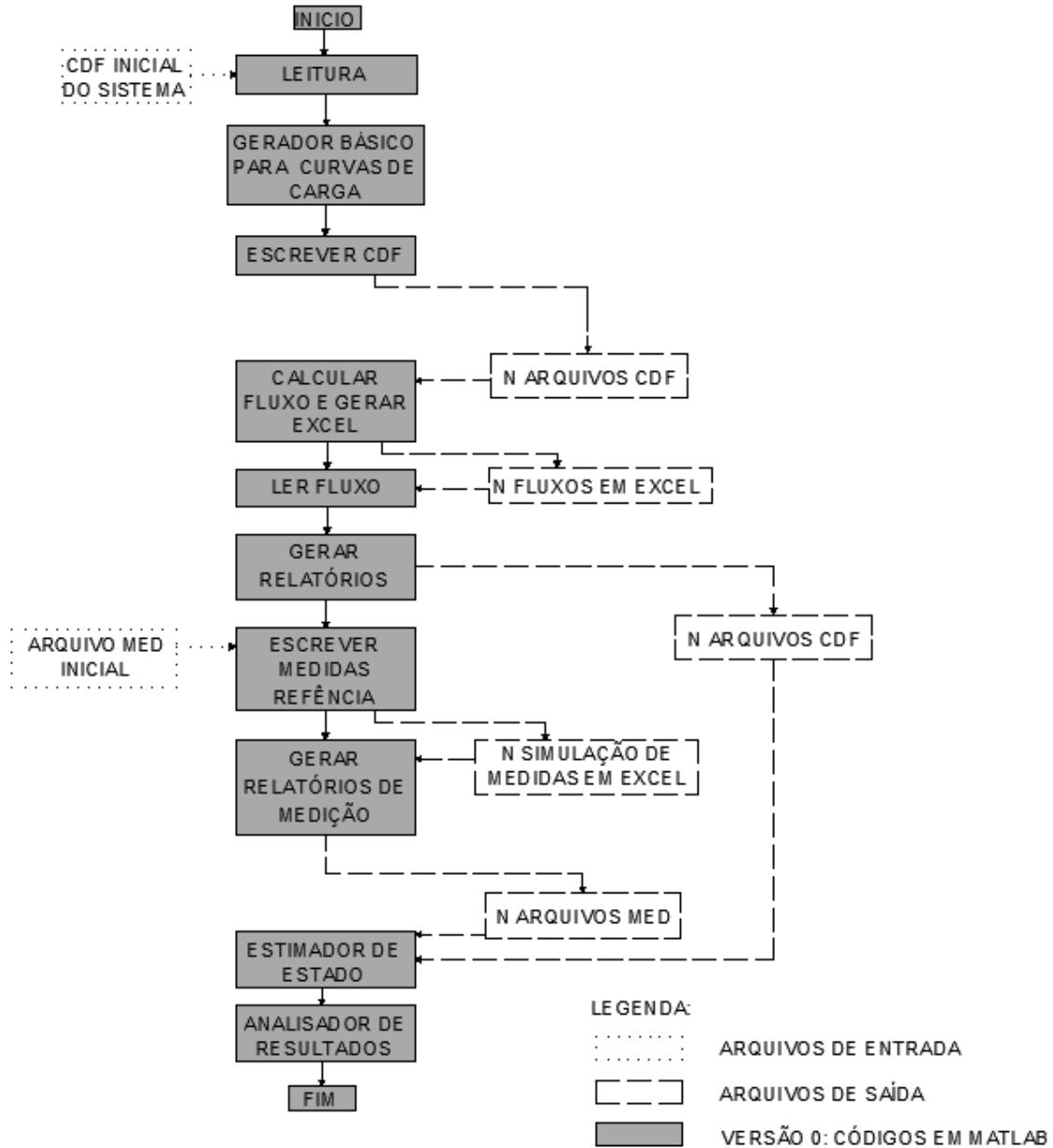
2. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

2.1 Versão 0

Iniciado pelo aluno Jackson Moura Batista em seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) [5], o SimSEP é uma aplicação que visa simular o comportamento de um sistema elétrico de potência ao longo de um dia, utilizando o MATLAB. O SimSEP utiliza como entrada um arquivo no formato IEEE Common Data Format (.cdf), contendo as informações da topologia do sistema a ser analisado – Vide Apêndice A.

O programa se inicia gerando curvas de carga para cada barra do sistema baseando-se, até aqui, em um formato fixo previamente definido no código, ponderado pelos valores de carga fornecidos pelo arquivo CDF inicial e depois os salva em N arquivos distintos no diretório escolhido conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6: Modelo Específico da Versão 0 do SimSEP - Jackson Moura



Fonte: autoria própria.

Em sequência, o SimSEP calcula o fluxo de potência do sistema em intervalos de tempo, utilizando o método de Newton-Raphson Desacoplado os salvando. Embora

um módulo de despacho de geração tenha sido desenvolvido em outro trabalho, ele não está implementado na versão aqui empregada.

Após o cálculo do fluxo de potência, são aplicados medidores para simular leituras do sistema, considerando erros e incertezas típicas. As medições obtidas então permitem determinar o estado do sistema do ponto de vista de um possível sistema de operação.

Por fim, o SimSEP também possuirá o módulo de análise de estudos que responsável por consolidar e comparar os dados simulados e medidos para fornecer resultados ao usuário - ainda está em desenvolvimento.

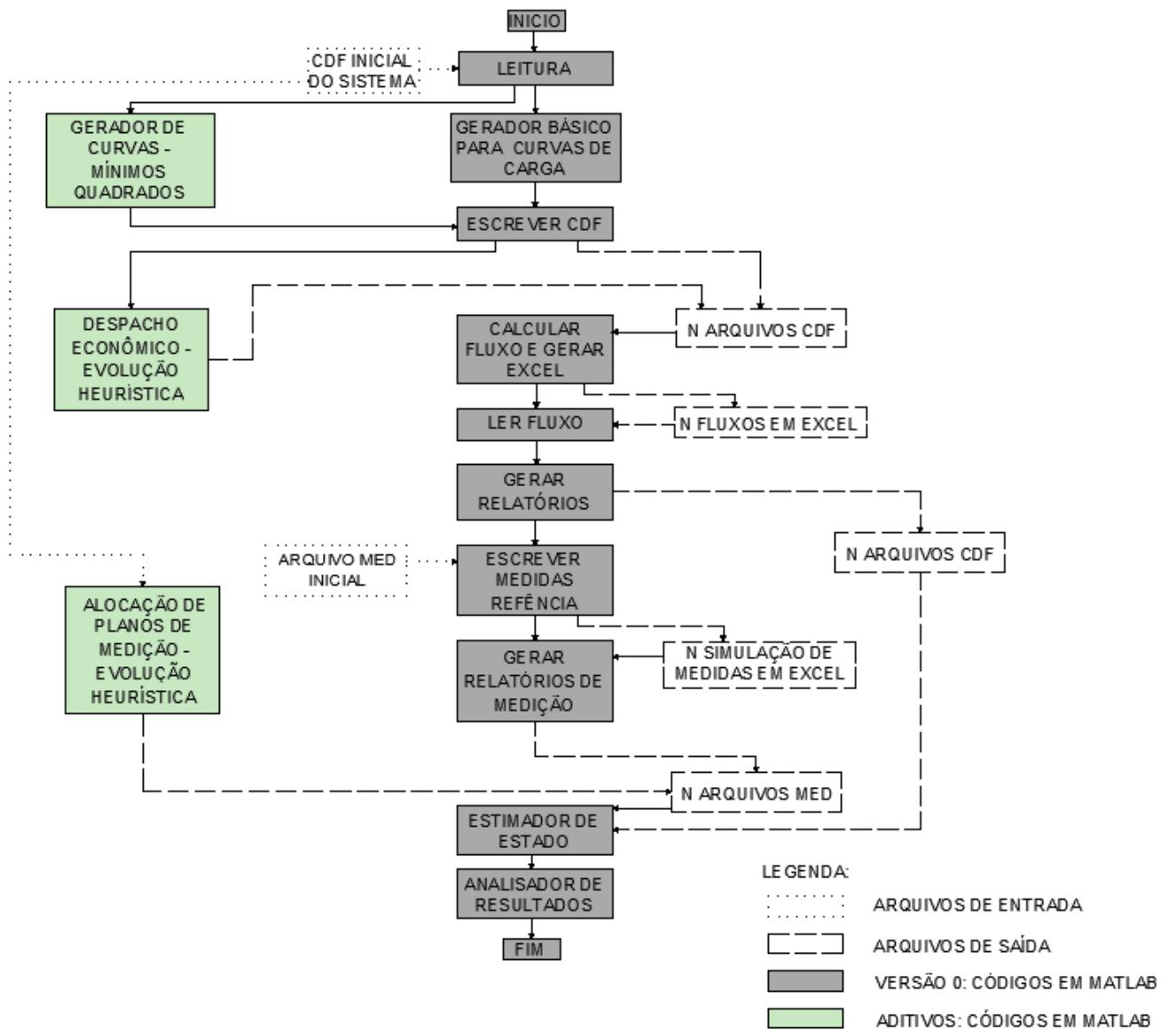
2.2 Versão 1

Após o lançamento da versão 0, houve mais três acréscimos que trouxeram melhorias a aplicação e constituindo a Versão 1 do SimSEP. De forma paralela ao desenvolvimento da Versão 0, em 2017 outro aluno de graduação também trabalhava em outro módulo do SimSEP: o módulo de Despacho Econômico [8]. Desenvolvido pelo aluno de graduação Raphael Bottino Arcos usando técnicas heurísticas de evolução, suas aplicações em MATLAB podem ser vistos como um módulo independente e precedente aos demais estudos uma vez que este determina as potências ótimas, do ponto de vista econômico, para despacho das usinas geradoras. No ano subsequente, dois outros alunos também contribuíram para esta nova versão com atualizações no módulo Estimador de Estados e Previsão de Carga.

Ayres Nishio Da Silva Junior, em seu trabalho de conclusão de curso propôs, também por meio de algoritmos evolutivos, a aprimoração da alocação de medidores na rede de modo a otimizar a quantidade de medidores perante a necessidade de garantir observabilidade do sistema [7]. Esta contribuição ao Estimador de Estados permitiu a seleção de diferentes planos de observação do sistema em simulação.

O trabalho desenvolvido pelo aluno Igor Ferreira Da Costa introduz novos métodos para geração de curvas de carga, utilizando princípios do método de mínimos quadrados [6].

Figura 7: Modelo Específico da Versão 1 do SimSEP



Fonte: autoria própria.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Considerações Iniciais

Como introduz Wood em seu sexto capítulo da terceira edição do livro *Power Generation, Operation, and Control*: “A natureza do carregamento dos componentes de transmissão de um sistema elétrico de potência compreende a solução do ‘fluxo de potência’ da rede.” [4]. Observa-se nas palavras de Wood que um estudo de fluxo de potência é, essencialmente, um estudo do fenômeno de transmissão de energia. Afinal, a principal função de um sistema elétrico de potência é converter energia, a partir de

formas naturalmente disponíveis, em energia elétrica e transportá-la até os pontos de consumo. Raramente a energia é utilizada diretamente em sua forma elétrica, sendo mais comum sua conversão em calor, luz ou energia mecânica. A grande vantagem da forma elétrica da energia é a facilidade de transporte e controle, aliados a elevados níveis de eficiência e confiabilidade [3]. Assim, para garantir essas características, o sistema deve ser projetado e operado de modo a atender requisitos fundamentais.

Uma consequência direta dessa perspectiva é que, para a resolução do fluxo de potência, pode-se assumir, de maneira geral, que a geração e a carga correspondem, respectivamente, a injecções e drenagens de potência elétrica na rede. Ou seja, faz parte do pressuposto de que a carga em cada barramento e o cronograma de geração, exceto em um barramento de referência, são conhecidos. Neste trabalho, por exemplo, uma das premissas dos simuladores é de que os dados de geração provenientes do despacho econômico já fornecem os valores de potência despachada para cada usina geradora da rede, com exceção da barra *swing*. Essas potências devem ser tratadas como constantes durante o cálculo do fluxo de potência, assim como as potências elétricas das cargas.

Entretanto, apesar dessas simplificações adotadas aqui, é importante destacar que modelos mais detalhados podem ser implementados, desde que sejam adequadamente representados. Por exemplo, no caso da geração, podem ser incluídos modelos de reguladores de tensão, de velocidade e ou estabilizadores. Enquanto às cargas, é possível adotar modelagens mais complexas, como os modelos de Impedância Constante (Z) e Corrente Constante (I), que, combinados com o modelo de Potência Constante (P), formam a conhecida modelagem “ZIP”.

O fluxo de potência é essencial para determinar os níveis de carregamento nos componentes da rede, avaliando sua conformidade com os limites operacionais. Pode-se entender o Fluxo de Potência como o estudo capaz de simular, por meio de seus modelos matemáticos, o comportamento de diferentes cargas (S) frente a diferentes condições de topologia e geração (G) – sob a ótica de regime estacionário.

Devido a propriedade de conservação de energia elétrica, o equacionamento deve ser tal que toda a geração seja consumida pela carga (S) mais as devidas perdas na topologia durante o processo de transmissão (Pd). O que significa também dizer que energia elétrica é um meio de transporte de energia e não a fonte em si.

$$G = S + Pd \quad (1)$$

Onde:

G : Potências de Geração.

S : Potências das Cargas.

Pd : Potências de Perdas durante a transmissão.

O conceito de “*load flow*” surgiu antes do advento dos computadores, quando a análise de redes elétricas era realizada por meio de modelos físicos compostos por resistores, indutores e capacitores equivalentes. Nessa abordagem manual, o impacto de novas cargas era avaliado progressivamente, o que resultava em uma solução complexa e limitada. Com a informatização, o termo “*power flow*” substituiu o conceito original, refletindo a abordagem numérica mais eficiente para resolver as equações do sistema [4]. Antes, porém, de abordar tais equações e seu método de soluções, convém introduzir algumas definições que serão amplamente utilizados neste trabalho.

3.2 Definições Gerais

Circuitos de corrente alternada (CA) – É um tipo de corrente elétrica em que a direção e a magnitude variam cicличamente ao longo do tempo, geralmente de forma senoidal. No domínio do tempo, por exemplo, a forma de onda de tensão e corrente é comumente expressa pelas equações 2 e 3. A representação senoidal ocorre naturalmente em sistemas elétricos CA devido a geometria das máquinas síncronas rotatória encontrada nas unidades geradoras.

$$v(t) = |V| \cdot \cos(\omega t + \theta_v) \quad (2)$$

$$i(t) = |I| \cdot \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3)$$

Onde:

$v(t)$: Tensão no domínio do tempo expressa em [V].

$|V|$: Magnitude da tensão expressa em [V].

ω : Frequência angular expressa em rad/s.

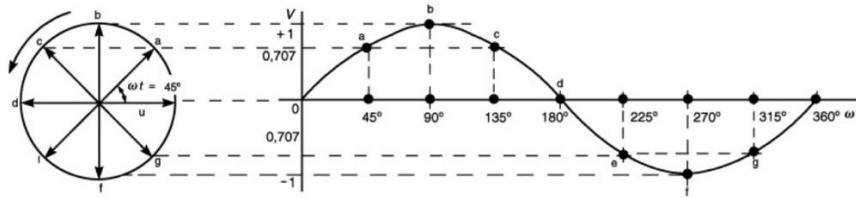
θ_v : Fase da tensão - em graus.

$i(t)$: Corrente no domínio do tempo expressa em [A].

$|I|$: Magnitude da corrente expressa em [A].

θ_i : Fase da corrente- em graus.

Figura 8: Diagrama de fasores e sua correspondência com a forma de onda senoidal



Fonte: autoria própria.

Fasorial – A representação fasorial é uma forma de descrever grandezas alternadas senoidais no domínio da frequência – utilizando-se da projeção natural dos fenômenos físicos da transmissão de energia elétrica em números complexos o que simplifica os cálculos em análise de circuitos. Neste domínio, as tensões e correntes são representados pelas equações 4 e 5. O módulo representa o máximo valor da senoide – o raio do círculo trigonométrico. Já o ângulo representa a fase inicial (igual a zero na Figura 8).

$$V = |V|e^{j\theta_v} \equiv |V|\angle\theta_v \quad (4)$$

$$I = |I|e^{j\theta_i} \equiv |I|\angle\theta_i \quad (5)$$

Onde:

V : Tensão fasorial.

$|V|$: Magnitude da tensão.

$e^{j\theta}$: Exponencial complexa.

θ_v : Fase da tensão.

I : Corrente fasorial.

$|I|$: Magnitude da corrente.

θ_i : Fase da corrente.

j : Termo Imaginário ($\sqrt{-1}$).

Potência Ativa (P) – Fonte de energia capaz de realizar trabalho.

Potência Reativa (Q) – Fonte de energia para sustentar os campos magnéticos e elétricos necessários ao funcionamento de equipamentos como motores e transformadores.

Potência Aparente (S) – Potência aparente (S) é uma grandeza fundamental no estudo de sistemas elétricos que representa a potência total fornecida por uma fonte de corrente alternada (CA). No plano fasorial, a potência aparente é a soma vetorial de suas duas componentes: potência ativa (P) e reativa (Q) de acordo com a equação 6, mas também pode ser calculada pela multiplicação da tensão (V) pelo conjugado da corrente

elétrica (I^*), como mostra a equação 7. As equações 8 e 9 mostram que as tensões e correntes no sistema elétrico, são capazes de fornecer informações sobre as potências elétricas, que pode tanto estar sendo drenada por uma carga, ou fornecida pelas unidades geradoras.

$$S = P + Qj \quad (6)$$

$$S = V \cdot I^* \quad (7)$$

$$P = |V| \cdot |I| \cdot \cos \phi \quad (8)$$

$$Q = |V| \cdot |I| \cdot \sin \phi \quad (9)$$

Onde:

S : Potência aparente - é expressa em [VA].

P : Potência ativa - é expressa em [W].

Q : Potência reativa - é expressa em [Var].

j : Termo Imaginário ($\sqrt{-1}$).

V : Tensão fasorial.

I^* : Conjugado da corrente fasorial – isto é $I^* = |I| \angle -\theta_i$.

$|V|$: Magnitude da tensão.

$|I|$: Magnitude da corrente.

ϕ : Ângulo de defasagem entre tensão e corrente.

Fator de Potência – o cosseno do ângulo de defasagem ϕ muitas vezes é associado ao fator de potência e para um sistema AC senoidal 60Hz livre de qualquer perturbação de fato é igual ao fator de potência (fp). Entretanto, a abordagem mais correta para a definição de Fator de Potência é pela equação 10, ou seja, pela razão entre a potência ativa do sistema e potência aparente demanda por ele. Pode ser tanto indutivo (ou atrasado), quanto capacitivo (ou adiantado). O que essencialmente significa um consumo de potência reativa negativa ($-Q$), quando atrasado pois simboliza um consumo de reativo, ou potência reativa ($+Q$) positiva quando adiantado, já com o significado de que naquele ponto há a geração de potência reativa.

$$fp = \frac{P}{S} \quad (10)$$

Onde:

fp : Fator de Potência - Adimensional.

S : Potência aparente - é expressa em [VA].

P : Potência ativa - é expressa em [W].

Barra – Elemento final de uma rede também chamado de nó. É o responsável por conectar as cargas e as gerações as redes de transmissão – vide Figura 1.

Variáveis de Estado - no contexto de controle, as variáveis de estado são as menores informações necessárias para descrever completamente o comportamento dinâmico de um sistema em um dado instante. Essas variáveis, geralmente representadas por um vetor, descrevem a evolução do sistema ao longo do tempo e estão associadas às equações diferenciais ou às equações de estado do sistema. No contexto de fluxo de potência, as variáveis de estado representam os valores necessários para descrever completamente o estado elétrico do sistema, isto é, tensão e ângulo de defasagem da tensão:

- Tensão ($|V|$): magnitude da tensão em cada barra.
- Ângulo (θ): ângulo de fase da tensão em cada barra.

Flat Start – o flat-start é uma abordagem inicial para resolver o fluxo de potência, onde todas as tensões e ângulos, variáveis de estado do problema do fluxo de potência, nas barras são assumidas com um valor inicial padrão de 1pu para as tensões e 0rad para os ângulos desconhecidos. A aproximação *Flat Start* é uma boa aproximação e já bem próxima da realidade uma vez que é esperado que as tensões nos barramentos estejam próximas das tensões especificadas de projeto, isto é V_{base} . Os ângulos podem ser maiores, especialmente em graus, mas como o cálculo ocorre com os ângulos em radianos também zero é uma boa aproximação inicial.

Estabilidade do sistema elétrico – Segundo a definição proposta pelo trabalho integrado proposto por membros do IEEE em [9], a estabilidade do sistema elétrico de potência é a capacidade do sistema, para uma condição inicial de operação dada, de recuperar um estado de equilíbrio operacional após ser submetido a uma perturbação física, mantendo a maior parte das variáveis do sistema dentro de limites aceitáveis, de forma que praticamente todo o sistema permaneça intacto.

Estabilidade do ângulo do rotor – A estabilidade do ângulo do rotor refere-se à capacidade das máquinas síncronas de um sistema de potência interligado de permanecerem em sincronismo após serem submetidas a uma perturbação. Essa estabilidade depende da habilidade de manter ou restaurar o equilíbrio entre o torque

eletromagnético e o torque mecânico de cada máquina síncrona no sistema. Quando ocorre instabilidade, ela se manifesta na forma de oscilações angulares crescentes de alguns geradores, levando à perda de sincronismo em relação aos demais geradores o que se manifesta em defasem angulares de tensão nas barras instáveis [9].

Estabilidade de tensão – A estabilidade de tensão refere-se à capacidade de um sistema elétrico de potência de manter tensões estáveis em todas as barras do sistema após ser submetido a uma perturbação, considerando uma condição inicial de operação. Essa estabilidade depende da habilidade de manter ou restaurar o equilíbrio entre a demanda das cargas e o suprimento fornecido pelo sistema. A instabilidade que pode ocorrer se manifesta como uma queda ou elevação progressiva das tensões em algumas barras. Um possível desfecho da instabilidade de tensão é a ocorrência de um colapso de tensão e a consequente perda de carga em uma área, ou o desligamento de linhas de transmissão e outros elementos pelos seus sistemas de proteção, levando a desligamentos em cascata. Além disso, a perda de sincronismo de alguns geradores pode resultar desses desligamentos ou de condições operativas que violem os limites de corrente de campo [9].

Colapso de tensão – Segundo Wood em [4], o colapso de tensão ocorre quando a potência reativa exigida pelo sistema de transmissão torna-se insuficiente para atender à demanda, levando o sistema a uma situação crítica de instabilidade. Esse fenômeno está frequentemente associado ao chamado nariz das curvas PV, que representa o ponto de máximo carregamento antes da queda abrupta da tensão, tema que será explorado em mais detalhes nas seções seguintes.

Barras com regulação de tensão ou compensadores síncronos – De acordo com Zhao et al. em [10], na análise estática de sistemas elétricos de potência, considera-se que a potência reativa fornecida pelos geradores e por reatores e capacitores comutáveis pode variar instantaneamente, dentro de seus limites físicos, para manter as magnitudes de tensão em determinadas barras do sistema. Essas barras são conhecidas como barras com regulação de tensão, pois possuem controle ativo para manter a tensão desejada, mesmo diante de variações de carga ou condições operativas. Além dos geradores e shunts comutáveis, os compensadores síncronos também desempenham

papel fundamental nessas barras, atuando como fontes dinâmicas de potência reativa capazes de regular a tensão de forma rápida e precisa, contribuindo significativamente para a estabilidade e o desempenho do sistema elétrico.

Barras de identificação difícil – Segundo Zhao et al. [10], no processo de cálculo do fluxo de potência, existem barras cujo tipo (PV ou PQ) é frequentemente trocado durante as iterações — essas barras são denominadas no artigo como barras de identificação difícil. Isso ocorre porque, devido às condições de operação e aos limites físicos (como limites de fornecimento de potência reativa), o algoritmo precisa alternar o tratamento dessas barras para garantir a convergência e a precisão do cálculo. Essas barras representam desafios específicos no fluxo de potência porque exigem um monitoramento constante do balanceamento entre geração e demanda de potência ativa e reativa, e muitas vezes dependem de recursos como compensadores síncronos e dispositivos de controle para manter a estabilidade do sistema.

Mismatch de Potência – Diferença entre as potências especificadas de carga e de geração e a potência líquida calculada no fluxo de potência para cada barra do sistema.

Divergência Numérica – Divergência a qual os *Mismatch* de potências crescem rapidamente, indicando que o sistema é numericamente impossível. Geralmente está associado ao colapso de tensão e ângulo.

Divergência de Identificação – para as barras que possuem geração de reativo, é divergência a qual os *Mismatch* de potências tendem a zero ou a algum valor constante, entretanto não é possível identificar corretamente o tipo de barra durante as iterações do fluxo de potência para algumas barras do sistema - as Barras de identificação difícil.

3.3 Por Unidade - PU

As redes de corrente alternada (CA) trifásicas (3Φ) são utilizadas para a transmissão de energia elétrica, e estudos de fluxo de potência baseiam-se em uma representação de circuito equivalente por unidade em monofásico. Tal modelo é válido apenas quando o sistema opera em modo balanceado, onde as outras fases possuem as

mesmas tensões e correntes, defasadas em $\pm 120^\circ$. As outras fases podem ser obtidas por simples adição ou subtração, dependendo da transformação utilizada para obter o equivalente por fase. Como o sistema está em modo balanceado, apenas a rede de sequência positiva é considerada [4].

O sistema por unidade (PU) é uma metodologia utilizada em análise de sistemas elétricos para normalizar grandezas como tensões, correntes, impedâncias e potências. Ele facilita a comparação e o cálculo em sistemas complexos, eliminando diferenças de escala e simplificando a análise de componentes conectados em diferentes níveis de tensão.

No sistema PU, as grandezas elétricas são expressas como frações ou múltiplos de valores base previamente definidos. Ou seja, é um valor adimensional capaz de revelar a escala da ordem de grandeza.

Normalmente, escolhe-se as bases de potência (S_{base}) e tensão (V_{base}) para cada nível do sistema por meio das equações 11 e 12, daí é só calcular as correntes e impedâncias bases pelas equações 13 e 14. Para as potências ativas e reativa usa-se a potência base S_{base} que é comum a todas as formas de potência – equações 15 e 16.

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} \quad (11)$$

$$S_{pu} = \frac{S_{real}}{S_{base}} \quad (12)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (13)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (14)$$

$$P_{pu} = \frac{P_{real}}{S_{base}} \quad (15)$$

$$Q_{pu} = \frac{Q_{real}}{S_{base}} \quad (16)$$

Onde:

V_{base} : Tensão base.

V_{real} : Tensão real.

V_{pu} : Tensão em pu.

S_{base} : Potência base.

S_{real} : Potência aparente real.

S_{pu} : Potência aparente em pu.

I_{base} : Corrente base.

Z_{base} : Impedância base.

P_{real} : Potência ativa real.

Q_{real} : Potência reativa real.

P_{pu} : Potência ativa em pu.

Q_{pu} : Potência reativa em pu.

Os sistemas em análise (IEEE 9, 14, 30 e 118 barras) neste estudo já estão com todos os parâmetros elétricos das redes em pu, não sendo necessário nenhuma conversão de base. As potências das cargas e das gerações precisam de referência para a sua transformação. A potência base será adotada será 100MW para todos os sistemas estudados.

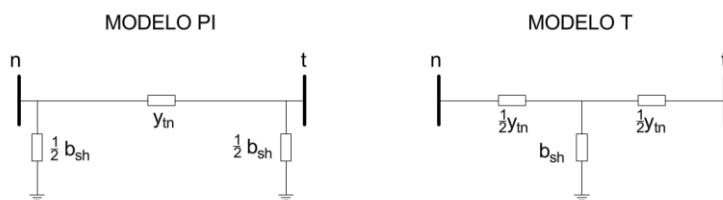
3.4 Modelagem dos Equipamentos de Rede

Os elementos que compõem a transmissão de energia em uma rede elétrica geralmente são linhas de transmissão, transformadores e reatores *shunts*. Uma abordagem robusta para esses elementos garante a base necessária para a análise detalhada e precisa do comportamento da rede elétrica.

3.4.1 Modelagem de Linha

A modelagem mais comum para linhas de transmissão é o circuito equivalente no formato “PI”. Para fins didáticos e para comparação de resultados, será utilizado também o modelo “T” da linha, cuja principal diferença reside na localização do Susceptânciaria *Shunt* de linha: no modelo “T”, o *shunt* de linha é colocado integralmente no meio da linha, enquanto, no modelo “PI”, ele é dividido em duas partes iguais, uma em cada extremo da linha – Vide Figura 9.

Figura 9: Modelo de Linha Equivalente.



Fonte: autoria própria.

Onde:

y_{tn} : admitância série da linha de transmissão.

b_{sh} : susceptânci da linha de transmissão.

$$y_{tn} = \frac{1}{z_{tn}} \quad (17)$$

$$y_{tn} = \frac{1}{r_{tn} + x_{tn}j} \quad (18)$$

Onde:

y_{tn} : admitância série da linha de transmissão.

z_{tn} : impedância série da linha de transmissão.

r_{tn} : resistência série da linha de transmissão.

x_{tn} : reatância série da linha de transmissão.

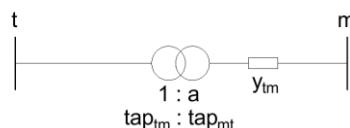
É importante destacar que, no contexto de problemas de fluxo de potência, o foco está nas tensões nos terminais das conexões. Por essa razão, modelos baseados em parâmetros concentrados, como os mostrados nas figuras, podem ser aplicados com segurança, independentemente das distâncias dos circuitos envolvidos. No entanto, para situações em que se deseja analisar grandezas elétricas em pontos intermediários das linhas, como a tensão no centro do circuito, é recomendável o uso de modelos com parâmetros distribuídos, especialmente para linhas de longa extensão tipicamente superiores a 100 km.

Nos arquivos CDF, a susceptânci shunt da linha de transmissão é identificado na coluna 9 da tabela de informações das barras, enquanto a parte resistiva e indutiva da impedância série é identificado pelas colunas 7 e 8 na mesma tabela – vide Apêndice A.

3.4.2 Modelagem de Transformador em fase

O transformador em fase pode ser modelado como uma bobina ideal de transformação a , onde a é a relação de transformação do transformador (tap_{mt}), conectado em série a uma impedância de dispersão equivalente, conforme figura abaixo.

Figura 10: Modelo de Transformador em Fase.



Fonte: autoria própria.

Nos arquivos CDF a relação de transformação é identificado na coluna 15 da tabela de informações do circuito – vide Apêndice A. É importante salientar que o TAP causa assimetria na Matriz de Admitâncias uma vez que os elementos fora da diagonal, os elementos que simbolizam as conexões, devem ser diferentes entre as duas diagonais conforme equação 19 e 20.

$$Y_{tm} = -\text{tap}_{tm} \cdot y_{tm} \quad (19)$$

$$Y_{mt} = -\text{tap}_{mt} \cdot y_{tm} \quad (20)$$

$$\text{tap}_{mt} = 1 \quad (21)$$

$$\text{tap}_{tm} = a \quad (22)$$

Onde

y_{tm} : admitância série do transformador.

Y_{tm} : admitância entre a barra t e m – elemento da matriz triangular superior.

Y_{mt} : admitância entre a barra m e t – elemento da matriz triangular inferior.

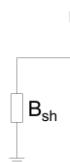
tap_{tm} : indica a posição de t para m no transformador no fluxo de potência.

tap_{mt} : indica a posição de m para t no transformador no fluxo de potência.

3.4.3 Modelagem de Reatâncias *Shunt*

Reatâncias *Shunts* de barra (B_{sh}), Figura 11, são comumente representados por modelos de potência constante. Sendo assim, os *Shunts* de barra podem ser representados matematicamente tanto pelo seu valor termos de potência nominal, como é feito nas simulações no ANAREDE. Ou então, como está sendo adotado pelas simulações presentes neste trabalho, pode-se adotar logo a informação como ela será utilizada pelas equações no fluxo de potência, isto é, em termos de Susceptância (em pu). Nos arquivos CDF são localizados pela coluna 18 da tabela de informações de Barra e são diretamente informados por sua Susceptância Indutiva.

Figura 11: Modelos de Reatâncias Shunts de Barra.



Fonte: autoria própria.

3.4.4 Matriz de Admitâncias – Matriz Y

A matriz de admitância nodal (ou Matriz Y) é uma função da topologia da rede que define a proporcionalidade entre as correntes e tensões elétricas em todos os nós – ou barras. Ou seja, é a matriz que torna válida a expressão segundo Monticelli:

$$I = Y \cdot E \quad (23)$$

Onde:

Y : matriz de admitância nodal.

I : vetor de corrente fasorial de cada nó composto por I_n ($n = 1, NB$).

E : vetor de tensão fasorial de cada nó composto por $E_n = V_n \angle \theta_n$ ($n = 1, NB$).

Genericamente expandindo essas matrizes para o caso de uma rede de NB nós obtém-se a forma genérica da equação X abaixo onde n representa o índice do nó analisado de tal modo que $n = 1, NB$. O resultado do produto de matrizes da equação Y leva a expressão da corrente em um determinado nó (equações 24 e 25).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$I_1 = Y_{11}E_1 + Y_{12}E_2 + \dots + Y_{1n}E_n \quad (25)$$

Onde:

I_1 : Corrente que flui pela barra 1.

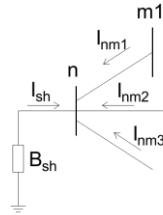
$Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1n}$: Componentes da matriz de admitâncias.

E_1, E_2, \dots, E_n : Tensões fasoriais em cada barra.

A “Lei dos Nós” de *Kirchoff* faz jus a conservação de energia e postula que a corrente em um determinado nó/barra é a soma das correntes de todas as demais barras que estão conectadas a este nó/barra de interesse além de influências do próprio nó, caso a este esteja atrelado alguma impedância/carga. A lei dos nós pode então ser representada pela equação 26 e pela Figura 12.

O fluxo de potência em qualquer ramo que conecta dois barramentos é determinado pelo fluxo série, referente ao segundo termo da equação 26, e pelo fluxo derivado nos shunts de barra e linha – e referente ao primeiro termo da equação 26.

Figura 12: “Lei dos Nós” de Kirchoff



Fonte: autoria própria.

$$I_{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} I_{nm} = 0 \quad (26)$$

Onde:

 n : índice que corresponde as diferentes barras do sistema ($n = 1, NB$). Ω_n : conjunto de todas as barras conectadas a barra n . m : índice da barra conectada a barra de interesse ($m \in \Omega_n$). I_{nm} : corrente fasorial que flui da barra m a barra n . I_{sh} : corrente fasorial de shunt de barra e linha. B_{sh} : Shunt de barra.

Conclusão que se toma a partir da equação 26 é que as componentes das correntes das barras não conectadas ao nó de análise, isto é, os termos da equação Y formados pelas componentes da matriz Y_{nm} serão todas nulas. Por exemplo, caso nó 2 não esteja conectado ao nó 1, as componentes Y_{12} e Y_{21} devem ser zeros. Por esta razão, quanto maior a rede, mais esparsa tende a ser a matriz Y . Uma Matriz é dita esparsa quando é formada por muitos elementos nulos.

Sendo o espaço amostral de todas as barras que estão conectadas a uma certa barra n representado por Ω_n , a expressão geral da corrente postulada por Monticelli em função da configuração da rede (topologia) pode ser dada pela equação 27 onde assim como na equação 26 ela possui apenas componentes de derivação e em série das barras e elementos de transmissão associados.

$$I_n = \left[jb_n^{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} (jb_{nm}^{sh} + a_{nm}^2 y_{nm}) \right] E_n + \sum_{m \in \Omega_n} (-a_{nm} y_{nm}) E_m \quad (27)$$

Onde:

 n : índice que corresponde as diferentes barras do sistema. Ω_n : conjunto de todas as barras conectadas a barra n . m : índice da barra conectada a barra de interesse ($m \in \Omega_n$). I_n : corrente fasorial da barra de interesse.

b_n^{sh} : susceptância shunt de barra.

b_{nm}^{sh} : susceptância shunt de linha.

a_{nm} : relação de transformação de transformador em fase.

y_{nm} : admitância série da linha ou do transformador.

E_n : tensão fasorial da barra de interesse.

E_m : tensão fasorial da barra conectada a barra de interesse.

Comparando as equações 27 e 25 obtém-se as duas expressões de formação geral da matriz de admitância: a equação 28 para elementos da diagonal e 29 para os elementos fora da diagonal (matrizes triangulares superior e inferior).

$$Y_{nn} = \left[jb_n^{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} (jb_{nm}^{sh} + a_{nm}^2 y_{nm}) \right] \quad (28)$$

$$Y_{nm} = \sum_{m \in \Omega_n} (-a_{nm} y_{nm}) \quad (29)$$

Onde:

n : índice que corresponde as diferentes barras do sistema ($n = 1, NB$).

Ω_n : conjunto de todas as barras conectadas a barra n .

m : índice da barra conectada a barra de interesse ($m \in \Omega_n$).

Y_{nn} : Elementos que compõe a diagonal da matriz de admitâncias.

Y_{nm} : Elementos que compõe a diagonal da matriz de admitâncias.

b_n^{sh} : susceptância shunt de barra.

b_{nm}^{sh} : susceptância shunt de linha.

a_{nm} : relação de transformação de transformador em fase - TAP.

y_{nm} : admitância série da linha ou do transformador.

Para a obtenção de todos os elementos da matriz de admitâncias Y , então, tem-se de considerar para cada conexão entre duas barras (nós) as seguintes condições de contorno:

- $a_{nm} = 1$ se a conexão for por linha de transmissão.
- $b_{nm}^{sh} = 0$ se a conexão for por transformador.
- $b_n^{sh} = 0$ se não houver Susceptância shunt de barra.

Convém também aqui mencionar que esta não é a forma mais canônica para representação da matriz de Admitâncias. Uma representação mais precisa seria também considerando o efeito da defasagem angular de um transformador trifásicos ou então para a implementação de um transformador defasador. Transformadores deste tipo tem a capacidade de tornar a matriz de Admitâncias assimétrica. Este trabalho assume então

como premissa estas simplificações, uma vez que não é pretensão simular todos os equipamentos utilizados nas linhas de transmissão do SEP.

Por fim, como a matriz de admitâncias é formada pelas impedâncias complexas da rede, isto é, possui uma parte real e outra imaginária. A parte real, G , também é conhecida como matriz de condutâncias, enquanto a parte imaginária, corresponde a matriz de susceptâncias da rede, isto é, ela pode ser segregada em duas matrizes distintas conforme equação 30 a seguir. A ordem destas matrizes vai depender do tamanho de barras do sistema.

$$Y = G + Bj \quad (30)$$

Onde:

Y : Matriz de admitâncias nodais.

G : Matriz de condutâncias nodais.

B : Matriz de susceptâncias nodais.

j : Termo Imaginário ($\sqrt{-1}$).

Algumas particularidades da matriz de admitâncias (Matriz Y), além da já comentada característica esparsa, encontram-se os fatos de que é sempre uma matriz quadrada de ordem $NB \times NB$, onde NB refere-se ao número de barras do sistema estudado. Outra característica importante é de que ela é sempre simétrica para redes sem transformadores.

3.5 Equacionamento do Power Flow

Várias técnicas permitem o estudo de sistemas elétricos e interconexões em computadores digitais. Essas técnicas têm em comum a separação da solução do sistema CA em dois conjuntos de equações lineares. A técnica mais amplamente utilizada divide as equações de potência ativa e reativa em dois conjuntos independentes. O primeiro conjunto são as equações de potência ativa; o segundo, as equações de potência reativa.

$$P_n(V_n, \theta_n) = V_n \cdot \sum_{m \in \Omega_n} V_m (G_{nm} \cos(\theta_{nm}) + B_{nm} \sin(\theta_{nm})) \quad (31)$$

$$Q_n(V_n, \theta_n) = V_n \cdot \sum_{m \in \Omega_n} V_m (G_{nm} \sin(\theta_{nm}) - B_{nm} \cos(\theta_{nm})) \quad (32)$$

Onde:

n : índice que corresponde as diferentes barras do sistema ($n = 1, NB$).

P : Potência ativa da barra n .

Q : Potência reativa da barra n .

V_n : Tensão fasorial da barra n .

V_m : Tensão fasorial da barra m conectada a barra n .

Ω_n : conjunto de todas as barras conectadas a barra n .

m : índice da barra conectada a barra de interesse ($m \in \Omega_n$).

G_{nm} : Condutância do elemento que conecta as barras nm .

B_{nm} : Susceptânciia do elemento que conecta as barras nm .

θ_n : Ângulo de fase da tensão no nó n .

θ_{nm} : Deslocamento angular tal que $\theta_{nm} = \theta_n - \theta_m$.

O principal resultado então dessas equações é o fluxo de potência em todos os dispositivos de transmissão e/ou distribuição. Após a realização destes cálculos, para finalizar o estudo, em cada dispositivo é verificado em relação à sua capacidade de fluxo para determinar se o dispositivo permanecerá dentro dos limites operacionalmente aceitáveis.

Observando as duas equações, uma vez conhecida a topologia da rede, é notório a interdependência entre quatro variáveis de estado: as potências ativas e reativa de cada barra (P_n e Q_n), as tensões e os deslocamentos angulares (V_n e θ_n). Isto significa que, especificando o valor de ao menos duas destas quatro variáveis as outras duas, caso haja solução viável, estarão completamente determinadas pelas equações 31 e 32. Do ponto de vista matemático, é possível escolher qualquer par de variáveis para análise. Contudo, ao avaliar cada barramento, é fundamental especificar apenas as variáveis que são previamente conhecidas. A seleção dessas variáveis é influenciada pelo tipo de dispositivo conectado ao barramento em questão. Diversas possibilidades são apresentadas na Tabela 1, que classifica os tipos de barramento com base nas variáveis ou grandezas conhecidas e exemplos de aplicação.

O primeiro tipo de barramento, identificado como $V\emptyset$, é chamado de barramento de referência, balanço ou *swing*. Ele costuma ser associado a um gerador, já que sua função principal é equilibrar a geração com a demanda e as perdas no sistema. Nesse tipo de barramento, não há limites impostos à geração de potência ativa. Em circuitos de corrente alternada (CA), uma barra é escolhida como referência de fase, e isso é feito fixando o ângulo de fase da tensão em 0 no barramento de referência. Além disso, é comum definir a magnitude da tensão, pois os geradores, por meio de seus excitadores, geralmente têm controle direto sobre a tensão. Entretanto, essa prática não

é obrigatória, e a magnitude da tensão pode ser calculada caso a potência reativa seja definida.

Tabela 1: Tipos de barras em modelagem de SEP

TIPO DE BARRA	GRANDEZAS CONHECIDAS	GRANDEZAS DESCONHECIDAS	OBSERVAÇÕES
Barra V \emptyset ou Barra swing	V_n e \emptyset_n	P_n e Q_n	<ul style="list-style-type: none"> Fornece a referência angular; Fecha o balanço de potência ativa e reativa do sistema, levando em consideração as perdas do sistema de transmissão.
Barra PQ	P_n e Q_n	V_n e \emptyset_n	<ul style="list-style-type: none"> Não existe qualquer controle de tensão nestas barras.
Barra PV	P_n e V_n	Q_n e \emptyset_n	<ul style="list-style-type: none"> Existem dispositivos de controle que permitem manter o módulo de tensão e a injeção de potência ativa em valores especificados, tais como os geradores e compensadores síncronos.
Barra P	P_n	V_n , Q_n e \emptyset_n	<ul style="list-style-type: none"> Barra utilizada para controlar a tensão de uma barra remota.
Barra PQV	P_n , Q_n e V_n	\emptyset_n	<ul style="list-style-type: none"> Barra de carga que passa a ter sua tensão controlada remotamente por uma ou mais barras P ou por um ou mais transformadores de TAP's variáveis.
Barra \emptyset	\emptyset_n	P_n , Q_n e V_n	<ul style="list-style-type: none"> Barra onde se especifica \emptyset, valor de referência dos ângulos das tensões.

Fonte: autoria própria.

O tipo de barramento PQ é utilizado para identificar qualquer barramento no qual as potências ativas e reativas sejam conhecidas desde que a barra não possua nenhuma geração conectada. Esse tipo de barramento é o mais comum em sistemas elétricos e correspondem, dentre outras, as barras de carga de consumo. Para barramentos desse tipo, resolvem-se as variáveis desconhecidas como a magnitude da tensão e ângulo de deslocamento de carga entre as barras.

Já o barramento do tipo PV, conhecido como "barramento de tensão controlada por injeção de reativo", é dividido em classificações distintas devido às diferenças nos mecanismos de controle. Em barramentos PV, normalmente associados a geradores ou compensadores síncronos, as variáveis P_n e V_n são controladas e, portanto, devem ser especificadas conforme são conhecidas. Entretanto, as características operacionais do gerador devem respeitar os limites de sua capacidade, sendo possível que outros equipamentos de potência reativa assumam o controle para atender às exigências.

Os limites operativos das máquinas geradoras de potência reativa (compensadores síncronos por exemplo) são uma peculiaridade desse tipo de barramento, pois o valor necessário para manter uma determinada tensão não é diretamente resolvido nas equações matriciais. Em vez disso, Q_n para esse tipo de barra é recalculado com base nos valores mais recentes de magnitude e ângulo de tensão descobertas. Caso o valor calculado ultrapasse os limites permitidos, o valor de Q_n é ajustado para o limite correspondente, e a restrição na magnitude da tensão V_n é liberada, transformando o barramento de PV para PQ. Quando isto acontece, é como se a aquela barra que outrora era classificada como barra geração, agora passasse a ser uma carga (sem o controle de tensão). Durante as iterações subsequentes, deve-se verificar continuamente a necessidade de potência reativa para sustentar a tensão desejada. Quando Q_n volta a atender aos limites aceitáveis, o barramento é redefinido como PV – o controle se restabelece. Esse processo pode ocorrer diversas vezes ao longo da solução.

Outros tipos de controle de tensão são os barramentos P e PQV que podem ser utilizados para modelar controle de tensão remoto ou ainda barras com transformadores TCUL (reguladores de carga com troca de TAP). Nesse caso, as potências ativas e reativas no barramento são fixas, enquanto o ajuste do TAP controla a tensão. O barramento controlado é modelado de maneira semelhante ao barramento PV na equação de potência ativa, mas a equação de potência reativa é substituída por uma relação que vincula a magnitude da tensão ao ajuste do TAP do transformador. Modelos semelhantes são estendidos para dispositivos FACT, que oferecem controle equivalente. É importante observar que apenas um dispositivo deve controlar a tensão em um barramento por vez em cada iteração.

Todavia, apesar de serem amplas as possibilidades de implementação de controle de tensão nos barramentos, este trabalho não tem a pretensão de abordar todas

elas. Em vez disso, os simuladores aqui desenvolvidos concentram-se exclusivamente no controle de tensão aplicado às barras de geração. Assim, apenas três tipos de barras serão considerados: $V\delta$, PQ e PV . Todos os demais tipos de controle, que foram omitidos neste estudo, poderão ser futuramente implementados com base nos conceitos teóricos resumidos na Tabela 1.

3.6 Soluções do *Power Flow*

3.6.1 Consideração Inicial

A abordagem tradicional, como o método de Gauss-Seidel, para resolução do apresenta simplicidade e eficiência para redes menores, mas torna-se limitada diante da complexidade dos sistemas modernos, especialmente com o aumento da integração de fontes renováveis e dispositivos eletrônicos. Neste contexto aparece o método de Newton-Raphson.

O método de Newton-Raphson é uma técnica iterativa amplamente utilizada para encontrar soluções de sistemas de equações não lineares. A convergência quadrática garante que o método é rápido para valores iniciais próximos à solução. Esse método baseia-se na solução de uma equação não linear na forma de vetor-matriz conforme equação 33.

$$F(X) = 0 \quad (33)$$

Onde F é uma função vetorial não linear de argumento vetorial X . Um chute inicial para X , isto é, X_0 , permite escrever a expansão de Taylor de primeira ordem em sua forma vetorial-matricial de $F(X)$ em torno de X_0 , conforme as equações em 34 e 35.

$$F(X) = 0 = F(X_0) + J \cdot \Delta x \quad (34)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial x_j} \quad (35)$$

Onde:

F : Função genérica vetorial.

J : Matriz Jacobiana do sistema.

X_0 : Matriz Jacobiana do sistema.

Δx : Correção de primeira ordem de X_0 .

J_{ij} : Componente da Jacobiana do sistema.

F_i : Componente i do vetor de funções.

x_j : Componente j do vetor de variáveis.

Outra forma de postular a Lei dos nós é justamente pela conservação de energia, isto é, a soma de todas as potências fluindo na barra n para as barras m conectadas a esta última deve ser nulo.

$$S_{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} S_{nm} = 0 \quad (36)$$

$$P_{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} P_{nm} = 0 \quad (37)$$

$$Q_{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} Q_{nm} = 0 \quad (38)$$

Onde:

n : índice que corresponde as diferentes barras do sistema ($n = 1, NB$).

Ω_n : conjunto de todas as barras conectadas a barra n .

m : índice da barra conectada a barra de interesse ($m \in \Omega_n$).

S_{nm} : Potência fasorial aparente da barra m para a barra n .

S_{sh} : Potência fasorial aparente de shunt de barra e linha.

n : índice que corresponde as diferentes barras do sistema ($n = 1, NB$).

Ω_n : conjunto de todas as barras conectadas a barra n .

m : índice da barra conectada a barra de interesse ($m \in \Omega_n$).

P_{nm} : Potência ativa que flui da barra m para a n .

Q_{nm} : Potência reativa que flui da barra m para a n .

P_{sh} : Potência fasorial ativa de shunt de barra e linha.

Q_{sh} : Potência fasorial reativa de shunt de barra.

O lado esquerdo das equações 37 e 38 são chamadas de potência líquida ativa e reativa respectivamente, como se apresenta nas equações 39 e 40.

$$P_l = P_{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} P_{nm} \quad (39)$$

$$Q_l = Q_{sh} + \sum_{m \in \Omega_n} Q_{nm} \quad (40)$$

Onde:

n : índice que corresponde as diferentes barras do sistema ($n = 1, NB$).

Ω_n : conjunto de todas as barras conectadas a barra n .

m : índice da barra conectada a barra de interesse ($m \in \Omega_n$).

P_{nm} : Potência ativa que flui da barra m para a n .

Q_{nm} : Potência reativa que flui da barra m para a n ..

P_{sh} : Potência fasorial ativa de shunt de barra e linha.

Q_{sh} : Potência fasorial reativa de shunt de barra e linha.

P_l : Potência ativa líquida.

Q_l : Potência reativa líquida.

Adicionando a contribuição das fontes de geração e o consumo das cargas, e adotando convecção de sinal como negativo para consumo e positivo para geração tem-se as equações 41 e 42 genéricas a todos os tipos de barras do sistema - a depender do tipo de barra e dos tipos de conexões existente entre elas pode não haver um ou outro termo.

$$P_{gen} - P_{carga} - P_l = 0 \quad (41)$$

$$Q_{gen} - Q_{carga} - Q_l = 0 \quad (42)$$

Onde:

P_l : Potência ativa líquida.

Q_l : Potência reativa líquida.

P_{carga} : Potência ativa da carga.

Q_{carga} : Potência reativa da carga.

P_{gen} : Potência ativa da geração.

Q_{gen} : Potência reativa da geração.

Resumidamente o objetivo é iterativamente, como será mais a frente detalhado, buscar reduzir a diferença entre as potências do gerador menos carga e as potências líquidas que serão calculadas por “chutes inteligentes” de Tensão e ângulo. O termo do lado esquerdo desta última equação é conhecido por resíduo de potências (ou *Mismatch* de potência). A conservação em cada barramento, exceto no barramento de referência, é a equação principal na formulação do fluxo de potência [4].

Comparando o sistema de equações de 41 com 42 e sabendo que as expressões de P e Q se relacionam com as variáveis de estado tensão e ângulo por meio das equações 31 e 32, pode-se resumir o problema do *Power Flow* como o problema que busca encontrar as quatro principais variáveis/grandezas elétricas isto é Tensão, ângulo de defasagem, potência líquida ativa e reativa para todas as barras do sistema sujeitos ao conjunto de equações genéricas 43.

$$\begin{cases} F(X) = (P_r(V, \theta), Q_r(V, \theta)) \\ F(X) = 0 \\ X = (V, \theta) \\ F = (P_r, Q_r) \end{cases} \quad (43)$$

Onde:

F : Função vetorial genérica representada para as grandezas elétricas;

X : Variáveis de Estado – Tensão (V) e ângulo de defasagem (θ);

P_r : Potência ativa líquida (equação 31)

Q_r : Potência reativa líquida (equação 32)

Para garantir que as características operacionais do gerador sejam também respeitadas, os limites de sua capacidade devem ser considerados nos cálculos. Para isso, acrescenta-se ao problema a inequação 44.

$$Q_{min} \leq Q_{gen} \leq Q_{máx} \quad (44)$$

Onde:

Q_{gen} : Potência reativa gerada por um gerador ou um CS.

$Q_{máx}$: Potência reativa gerada máxima.

$Q_{mín}$: Potência reativa gerada mínima.

Os limites operativos de potência ativa do gerador ($P_{mín} \leq P_{gen} \leq P_{max}$) também é importante para uma correta análise. Entretanto, comumente esta restrição é considerada nos estudos anteriores ao fluxo de potência - mais precisamente no cálculo do despacho econômico – ou ainda abordadas de forma integrada em fluxo de potência ótimo. Esta ferramenta é ideal para lidar com outras inequações que também podem ser encontradas quando se trata de *Power Flow* como inequações envolvendo os limites de tensão nas barras ou limite de corrente em linhas.

O problema proposto para os simuladores neste trabalho apenas considera os limites de reativo de unidades geradoras para a realização de controle de tensão nas barras da própria unidade de geração (Barra *PV*).

3.6.2 Jacobiana do Power Flow

A Jacobiana é o segredo por trás do método de Newton-Raphson e pode-se dizer que até o caracteriza. Os métodos desacoplado e desacoplado rápido são variações do método de Newton-Raphson que se utilizam de simplificações feitas justamente no

equacionamento da Jacobiana aproveitando as características do modelo de fluxo de potência. Uma característica aproveitada nestas simplificações é, por exemplo, no caso do método desacoplado, a característica de existir um acoplamento forte entre os pares (Q, V) e (P, θ) – Isto é, a dependência é maior entre potência reativa e tensão ou ainda entre potência ativa e ângulo. Para diferenciar, é comum encontrar o termo ‘Full Newton’ quando se utiliza a versão completa da matriz Jacobiana e será a versão utilizada nos simuladores deste trabalho por ser um método mais robusto

Estas simplificações em geral são ótimas simplificações que levam a boas respostas em um tempo menor (tão boas quanto a full-Newton). Estas aproximações funcionam bem para sistemas grandes de transmissão de energia em geral o sistema é bem condicionado, isto é $X \gg R$, então possui uma pequena relação R/X ; para sistemas com alta densidade de cargas (sistemas próximos do limite de colapso de tensão); ou ainda para sistemas com muitos transformadores com controle de TAP. Nestes casos as aproximações são válidas e assim como o resultado do estudo.

Sob determinadas condições, podem ser necessários a consideração também dos pares (Q, θ) e (P, V) para uma resposta precisa como, por exemplo, em sistemas mal condicionados. Em redes com altas resistências (como redes urbanas ou industriais), R/X é elevado, e as interações entre $P - V$ e $Q - \theta$ tornam-se mais significativas, invalidando as simplificações dos métodos desacoplados. Como o presente trabalho tem um dos objetivos a criação de um gerador de casos de estresse de potência ativa das cargas de modo a provocar perda proposital do controle de reativos, o modelo completo de Newton-Raphson será utilizado garantindo robustez dos dados.

Das definições dos itens anteriores, especialmente das equações 31, 32, 34 e 35, tem-se que a Jacobiana J é formada a partir das derivadas parciais das funções de potência ativa e reativa em relação às variáveis de estado θ (ângulo da tensão) e V (magnitude da tensão). A Jacobiana será então uma matriz de derivadas e, para o problema do fluxo de potência ela tem a forma genérica como apresentada na equação 45. *lin* e *col* correspondem a quantidade de linhas e coluna da Matriz Jacobiana que possui dimensões correlacionadas aos tipos de barra do sistema.

$$J(V, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} lin \times col \quad (45)$$

Onde:

$\partial P / \partial \theta$: Derivadas parciais da potência ativa em relação aos ângulos.

$\partial P / \partial V$: Derivadas parciais da potência ativa em relação às tensões.

$\partial Q / \partial \theta$: Derivadas parciais da potência reativa em relação aos ângulos.

$\partial Q / \partial V$: Derivadas parciais da potência reativa em relação às tensões.

Existem $NB - 1$ equações 31 para correlacionar P a algum θ , sendo NB número de barras presentes no estudo, P - potência ativa e θ - a defasagem angular. O ‘-1’ desconsidera a barra de referência uma vez que para esta é adotada constante e igual a zero ($\theta_{ref} = 0^\circ$). Outra forma de postular é através da equação 46 a seguir que relaciona a quantidade de dos diferentes tipos de barras do sistema e é utilizada para se guiar na formação da matriz Jacobiana.

$$Nº de equações P_\theta = NPQ + NPV = NB - 1 \quad (46)$$

Onde:

NPQ : quantidade de barras PQ (incluindo as barras de passagem).

NPV : quantidade de barras PV.

NB : número de barras do sistema.

$Nº de equações P_\theta$: número de equações que relacionam as variáveis P e θ .

Para as barras PV, existirão NPQ equações correlacionando a potência reativa (Q) com a tensão (V). Isto é, as barras PV, de tensão controlada, não precisam de equações não lineares para correlacionar Q a V . Ao invés disso, Q é calculado linearmente pela equação 32 à medida que tensões desconhecidas, vão se aproximando da realidade nas iterações do método de Newton – equação 47. A matriz Jacobiana J uma matriz quadrada, isto é $lin = col$ onde o número de linhas é a soma de todas as quantidades de equações conforme equação 48. Portanto, as dimensões da matriz Jacobiana neste caso particular considerando que todas as unidades geradoras possuem controle efetivo sobre a tensão deve ser conforme as equações 49 e 50.

$$Nº de equações Q_V = NPQ \quad (47)$$

$$lin = col = Nº de equações Q_V + Nº de equações P_\theta \quad (48)$$

$$lin = col = 2 \cdot NPQ + NPV \quad (49)$$

$$lin = col = NB - 1 + NPV \quad (50)$$

Onde:

NPQ : quantidade de barras PQ (incluindo as barras de passagem).

N° de equações Q_V : quantidade de equações que relacionam V e Q .

NPQ : quantidade de barras PQ (incluindo as barras de passagem).

NPV : quantidade de barras PV.

NB : número de barras do sistema.

N° de equações P_{θ} : número de equações que relacionam as variáveis P e θ .

Para as barras de tensão controlada (conhecida) e como o método iterativo de Newton se dão por ‘chutes’ das demais tensões desconhecidas, isto é, a cada iteração há um novo conjunto de valores para as tensões e ângulos para todas as barras – e que ficam cada vez mais próximos da solução. Portanto, os valores das potências reativas podem ser calculados diretamente pela equação 32. No caso em que se deseja monitorar as potências limites dos geradores, como é o objetivo aqui, esse cálculo é obrigatório uma vez que ele será utilizado para confrontar com os limites operativos da máquina em questão.

Então, para as barras PV , ou seja, que possuem controle de reativo, o que se faz é considerar constante as tensões em seus terminais e monitora-se constantemente durante as iterações as respostas do fluxo de potência para a barra em questão. Se for constatado que algum dos limites foi ultrapassado para a potência reativa de qualquer uma das barras PV , ainda durante as iterações, deixa-se de calcular a potência Q necessária para manter-se fixo V - afinal Q deve ser fixada no valor operativo máximo ou mínimo da máquina. E então passa-se a calcular tensão da barra em questão iterativamente, ou seja, a barra PV assume o papel de PQ (sem nenhum controle) e cuja potência reativa é justamente o limite operativo da máquina acrescido de eventuais cargas.

Quando as potências das cargas estão próximas de um limiar entre o controle e sua perda, é comum, que o cálculo oscile entre ter o controle ou não ter. Por isto é importante continuar monitorando as barras PV mesmo após a indicação de perda de controle. A solução pode voltar a ter controle ao longo do resto das iterações ao passo em que todas as tensões se acomodam a um novo patamar.

3.6.3 Apresentação ao algoritmo do Power Flow

O algoritmo é baseado no *Mismatch* de potência, que em tradução livre significa literalmente desvio de potência. Essa tradução ajuda a compreender a metodologia uma vez que o algoritmo busca por sucessivos passos reduzir a diferença entre as potências especificadas e as potências calculadas como indicado na equação X. Neste contexto, vale mencionar que as potências especificadas são as potências das cargas e dos geradores, aqui apenas representados por injeção (ou drenagem) de potência. O desafio é tornar essa diferença a cada iteração, menor. Em outras palavras, a diferença entre os valores calculados e especificados devem tender a 0. Como $X = (V, \theta)$ e $F = (P_l, Q_l)$, o objetivo é então posto em forma matricial como nas equações 53 e 54 a seguir.

$$\lim_{cont \rightarrow \infty} P_{gen} - P_{carga} - P_n^{cont} = 0 \quad (51)$$

$$\lim_{cont \rightarrow \infty} Q_{gen} - Q_{carga} - Q_n^{cont} = 0 \quad (52)$$

$$F(X) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\lim_{cont \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

Onde:

P_{gen} : Potência ativa gerada especificada (convencionalmente positiva)

Q_{gen} : Potência reativa gerada especificada (convencionalmente positiva).

P_{carga} : Potência ativa consumida especificada de carga (negativa).

Q_{carga} : Potência reativa consumida especificada de carga (negativa).

$cont$: Contador de iterações (passos) de Newton-Raphson.

P_n^{cont} : Potência ativa líquida calculada para cada barra n .

Q_n^{cont} : Potência reativa líquida calculada para cada barra n .

ΔP : Mismatch de potência ativa.

ΔQ : Mismatch de potência reativa.

F : Função vetorial de duas variáveis.

X : Variáveis de Estado do SEP.

Pelos limites das equações 54, é notório que o processo iterativo então leva a descoberta das raízes das equações, isto é, a determinação dos parâmetros desconhecidos tensão e ângulo de defasagem (variáveis de estado). O método Newton-Raphson lineariza o sistema usando a matriz Jacobiana e resolve por cálculos sucessivos o vetor

de correção. Este vetor de ângulos e magnitudes de tensão é necessária em cada iteração para reduzir os erros (ΔP e ΔQ) e aproximar o sistema da solução final. Uma forma genérica de expressar o vetor de correção é apresentado pela equação 55.

$$X^{cont+1} = X^{cont} + \Delta X \quad (55)$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \dots \\ \Delta\theta_{NB} \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \dots \\ \Delta V_{NPQ} \end{bmatrix}_{lin} \quad (56)$$

Onde:

ΔX : vetor de correção ou vetor de ajustes das variáveis de estado.

X^{cont+1} : valores das variáveis de estado no instante a ser premeditado.

X^{cont} : valores das variáveis de estado no instante anterior - $X^0 = flat start$.

$\Delta\theta$: correção nos ângulos de todas as barras (excluindo a barra *swing*).

ΔV : correção nas magnitudes das tensões das barras PQ (exceto a *swing* e PV).

NPQ : quantidade de barras PQ (incluindo as barras de passagem).

NPV : quantidade de barras PV.

NB : número de barras do sistema.

lin : dimensão do número de linhas da matriz Jacobiana ($NB - 1 + NPV$)

Então calcula-se o novo vetor de correção ΔX pela resolução do sistema linearizado por meio da equação 57. As iterações continuam até que $\Delta X < \epsilon$ onde ϵ é o critério de tolerância do algoritmo de Newton-Raphson. O algoritmo do *Power Flow* desenvolvidos neste trabalho será desenvolvido mais adiante.

$$\Delta X = J^{-1} \cdot (-F(X)) \quad (57)$$

Onde:

ΔX : vetor de correção.

J^{-1} : inverso da Matriz Jacobiana.

$F(X)$: Funções objetivos a serem linearizadas (equações 31, 32).

3.7 Controle de Tensão por Injeção de Potência Reativa

3.7.1 Consideração Inicial

Como já mencionado na apresentação do problema, nas barras PV o controle de tensão por injeção de potência reativa visa manter a magnitude de tensão especificada

controlada. Como os geradores nessas barras têm limites operacionais de potência reativa definidas por Q_{min} e $Q_{máx}$ como inequação 44, durante as iterações do método de Newton, a potência reativa pode exceder esses limites devido à distribuição de cargas e à operação do sistema.

A inclusão do controle de limites de potências reativas requer adaptações ao método, principalmente em barras com controle de tensão (barras PV). Quando Q ultrapassa Q_{min} ou $Q_{máx}$, a barra PV não consegue mais sustentar a magnitude de tensão especificada. Nesses casos, a barra é tratada como uma barra PQ:

- Se $Q_{gen} < Q_{min}$, a barra PV é convertida em PQ, com Q_{gen} fixado em Q_{min} .
- Se $Q_{gen} > Q_{máx}$, a barra PV é convertida em PQ, com Q_{gen} fixado em $Q_{máx}$.

3.7.2 Apresentação ao algoritmo

Após cada iteração no algoritmo de Newton-Raphson para a solução não linear do fluxo de potência, haverá então uma solução para as variáveis de estado X^{cont+1} conforme indicado na equação 55 - mesmo que estas soluções ainda não sejam as soluções finais. Isto é, se conhecerá neste instante do cálculo todas as tensões V_n e ângulos de defasagem θ_n para todas as barras do sistema de modo que, utilizando-se das equações 31 e 32, pode-se determinar por um simples cálculo linear o valor das variáveis P_n e Q_n correspondentes as variáveis de estado naquele momento - iteração $cont + 1$. Então, de posse do valor calculado de Q_n para a iteração, pode-se confrontar com os limites impostos pela especificação da geração nas barras PV.

- Se Q_n estiver dentro dos limites, a barra permanece PV.
- Se Q_n violar Q_{min} ou $Q_{máx}$, ajustar Q_n ao limite correspondente e reclassificar a barra como PQ.

Como esse processo é feito ao longo das iterações do algoritmo de Newton-Raphson, a cada iteração $cont + 1$ haverá a comparação e uma possível troca de status da barra de PV para PQ pode ser realizada. Há casos em que essa troca é prematura pois se pode descobrir que não poderia ter sido realizada a troca - o valor calculado de Q_n volta para dentro dos limites operativos. Isso acontece especialmente em sistemas com limites de operação muito estreitos para o carregamento em questão. Nestes casos

deve-se realizar a troca novamente para condizer com nova realidade. A barra PQ volta a ser considerada como barra PV nos cálculos. Portanto deve-se monitorar constantemente todas as barras de geração (barras PV) independente se a barra muda de status ao longo das iterações.

Uma maneira eficiente de confirmar eficiência da troca de status da barra é por meio de averiguação do perfil de tensão V_n sendo calculada a cada iteração para as barras de geração. Caso a barra de geração perca o controle da tensão por ter atingido algum de seus limites operativos, é esperado que a tensão nesta barra se afaste da tensão de controle especificada V_{espec} de modo que:

- Se $Q_{gen} < Q_{min}$ então a tensão calculada deverá ser maior que a tensão de controle, isto é: $V_n > V_{espec}$.
- Se $Q_{gen} > Q_{máx}$ então a tensão calculada deverá ser menor que a tensão de controle, isto é: $V_n < V_{espec}$.

Incoerências nestas verificações podem significar que a troca de status da barra de geração foi prematura e, portanto, deve-se voltar com o status previamente a troca.

Uma troca, além de apresentar uma solução errônea para a barra geradora avaliada, também pode sobrecarregar outras barras geradoras, degradar o perfil de tensão em regiões críticas ou dificultar a convergência. Dentre os diversos problemas operacionais e computacionais que podem surgir mediante o processo de troca incluem:

- Oscilações no Processo Iterativo: A barra pode alternar repetidamente entre os estados PQ e PV, dificultando a convergência do método de Newton.
- Sobrecarga de Outras Barras: Caso a barra reassuma o controle de tensão de forma incoerente, outras barras podem ser sobrecarregadas, levando a um desequilíbrio global.
- Resultados Não Realistas: A solução final pode não refletir a operação real do sistema, pois os limites de reativos podem ser violados em outras partes do sistema.

3.7.3 Mudanças impostas pelo controle.

A conversão dinâmica entre os tipos de barras requer atualizações no modelo matemático, alterando as variáveis de estado e a estrutura da matriz Jacobiana. Quando uma barra muda de tipo (por exemplo, de PV para PQ), os seguintes ajustes devem ser feitos:

Alteração das Variáveis de Estado:

- Para barras que mudam de PV para PQ: A magnitude da tensão ($|V|$) deixa de ser uma variável especificada e passa a ser uma variável de estado a ser calculada. Nesse caso, o Q da barra é fixado no limite.
- Para barras que mudam de PQ para PV: O Q deixa de ser fixado, e a magnitude da tensão ($|V|$) volta a ser especificada. O Q passa a ser calculado como parte do processo iterativo.

Modificação das Equações do Sistema:

- O número de equações ativas no sistema muda de acordo com o tipo da barra. Por exemplo, uma barra PV tem uma equação de potência ativa, enquanto uma barra PQ tem equações de potência ativa e reativa. Portanto, a matriz do sistema precisa ser ajustada para refletir a inclusão ou exclusão dessas equações.

Alteração do Tamanho da Jacobiana:

- Para uma barra que muda de PV para PQ, é adicionada uma nova linha correspondente à equação de potência reativa Q e uma nova coluna correspondente à variável $|V|$.
- Para uma barra que muda de PQ para PV, a linha correspondente a Q é removida, e a coluna correspondente a $|V|$ deixa de ser tratada como uma variável de estado.

Atualização dos Termos Derivativos:

- Quando $|V|$ passa a ser uma variável de estado (na mudança de PV para PQ), os termos $\partial P / \partial V$ e $\partial Q / \partial V$ devem ser recalculados para incluir o impacto de $|V|$ no balanço de potências.

- Quando Q deixa de ser uma variável independente (na mudança de PQ para PV), os termos relacionados a Q não são mais necessários.

Recalcular Dinâmico da Jacobiana:

- A matriz Jacobiana deve ser recalculada a cada iteração para refletir mudanças no sistema, especialmente em cenários onde várias barras estão operando próximas aos seus limites de reativos.

4. *GoSimul – GENERATOR OF SIMULATIONS*

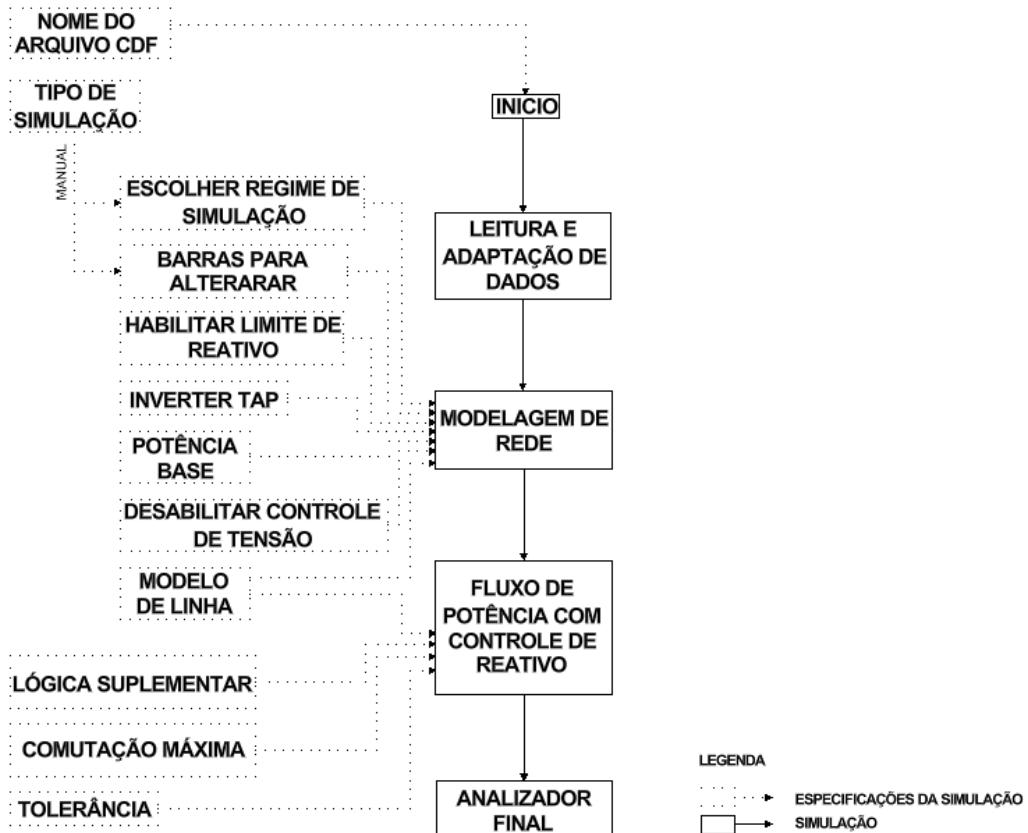
4.1 Considerações Iniciais

A partir dos métodos descritos no capítulo anterior foi elaborado em Python um simulador de Fluxo de Potência – método *Full-Newton* – capaz de controlar a tensão nas barras das unidades geradoras a partir da injeção de potência reativa nestas barras. O fluxograma representado pela figura X abaixo sintetiza a estrutura do *GoSimul* – *Generator of Simulation*.

Para a realização de testes foram utilizados como referências os sistemas dos arquivos CDF como os sistemas IEEE 9 barras, IEEE 14 barras, IEEE 30 barras e IEEE 118 barras conforme Apêndice A. Entretanto, a fins de exemplificar o desenvolvimento do GoSimul, o sistema genérico de três barras representados pela Figura 14 será utilizado. O sistema é composto por duas unidades geradoras, uma unidade na barra n , adotada como a barra de referência, e outra na barra m (que também é uma barra de carga). Ainda há um compensador síncrono (gerador de potência reativa) na barra de passagem t . As barras k e t são conectadas por duas linhas de transmissão paralelas enquanto que entre as barras t e m há um transformador de fase.

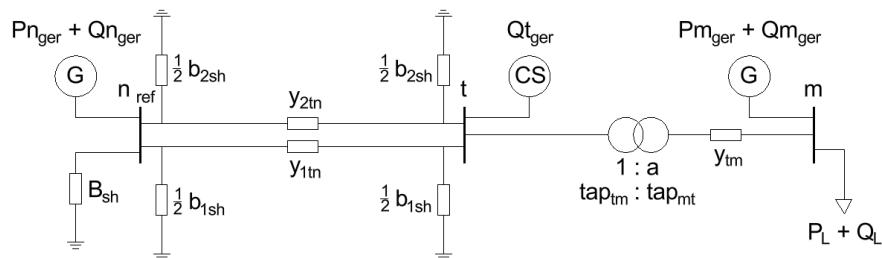
Os quatro desenhos típicos a seguir serão amplamente utilizados nos fluxogramas dos próximos capítulos afins de exemplificar o uso dos simuladores desenvolvidos.

Figura 13: Fluxograma Geral GoSimul - Generator of Simulations



Fonte: autoria própria.

Figura 14: Diagrama Unifilar - Exemplo de aplicação do GoSimul



Fonte: autoria própria.

Onde:

n_{ref} : Barra de Referência (swing).

t :Barra de Passagem.

m : Barra de Carga/Geração.

G: Gerador.

CS: Compensador Síncrono.

B_{sh} : Susceptância de barra.

b_{sh} : Susceptância de linha.

y : Admitância do elemento de conexão (linha ou transformador).

P_{ger} : Potência Ativa Gerada.

Q_{ger} : Potência Reativa Gerada.

P_L : Potência Ativa de Carga.

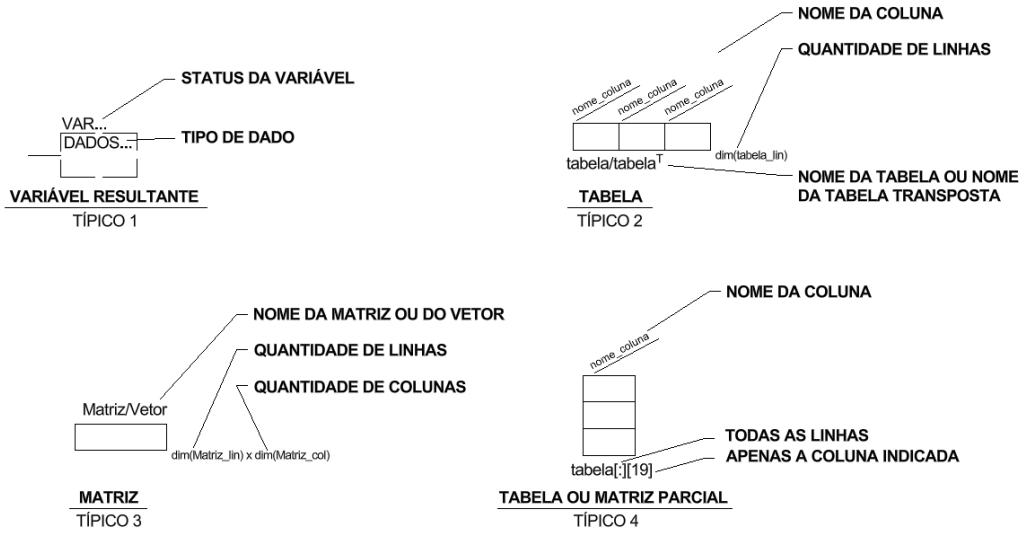
Q_L : Potência Reativa de Carga.

1: a: Relação de Transformação do Transformador.

tap_{tm} : Tap do transformador de t para m ($tap_{tm} = 1$).

tap_{mt} : Tap do transformador de m para t ($tap_{mt} = a$).

Figura 15: Legenda de Típicos para Tabelas de Dados



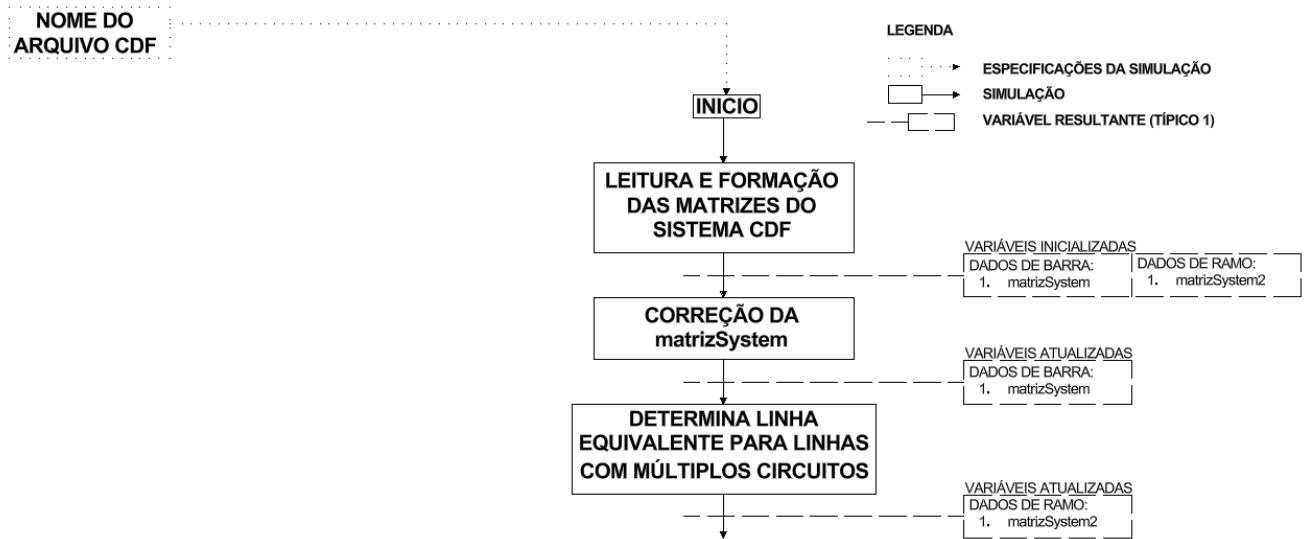
Fonte: autoria própria.

4.2 Leitura e Adaptação de Dados

O bloco de Leitura e Adaptação de Dados é composto por outros três sub-blocos: o primeiro onde efetivamente é remontado internamente as tabelas do arquivo CDF lido e os dois subsequentes onde ocorrem algumas adaptações que são feitas nestas tabelas de dados para contemplar todos os casos estudados.

A leitura dos dados do arquivo CDF define as duas tabelas de dados centrais do sistema: a tabela de dados de barra (matrixSystem) e a tabela de dados de ramo (matrixSystem2). A Figura 17 traz a representação destas tabelas para o caso genérico de 3 barras da Figura 14 e que também pode ser consultado na integra no Apêndice A. A leitura é feita por linha e por identificação de espaços vazios entre os dados das tabelas no arquivo CDF remontando-as internamente na programação.

Figura 16: Módulos de leitura inicial



Fonte: autoria própria.

Figura 17: Inicialização das Matrizes do Sistema

Índice da barra	nome da barra	tensão base	liga de barra	tensão nominal (pu)	desfasagem angular (graus)	potência ativa de carga (MW)	potência reativa de carga (MVA)	potência ativa de geração (MW)	potência reativa de geração (MVA)	tensão base (V)	tensão especificada de controle (pu)	limite superior de geração de reativo (MVA)	limite inferior de geração de reativo (MVA)	shunt de barra (pu)		
1	n	Vn _{base}	1	1	3	1.00	0.00	0.0	0.0	Pn _{ger}	Qn _{ger}	Vn _{base}	v _{nctrl}	Q _{max}	Q _{min} 0 B _{sh} 0	
2	t	Vt _{base}	1	1	0	1.06	0.00	0.0	0.0	Qt _{ger}	Vt _{base}	v _{tctrl}	Q _{max}	Q _{min} 0 0 0	0 0 0	
3	m	Vm _{base}	1	1	2	1.10	0.00	P _L	Q _L	Pm _{ger}	Qm _{ger}	Vm _{base}	v _{mctrl}	Q _{max}	Q _{min} 0 0 0	0 0 0

Índice DE	Índice PARA	resistência do elemento de ramo (pu)	resistância do elemento de ramo (pu)	suscepéncia shunt (pu)	TAP (pu)										
1	2	1	1	1	0	r _{1ln}	x _{1ln}	b _{1sh}	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
1	2	1	1	1	0	r _{2ln}	x _{2ln}	b _{2sh}	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
2	3	1	1	1	0	r _{lm}	x _{lm}	0	0 0	0 0	0 0	0 tap _{lm}	0 0	0 0	0 0

dim(matrizSystem2)

LEGENDA

NB Nº DE BARRAS

Fonte: autoria própria.

Entretanto, para alguns nomes de barras dos sistemas testes, há nomes simples e outros compostos. Por exemplo, no sistema IEEE 30 a barra de número 1 é nomeada de “Glen Lyn”, enquanto a barra 2 é chamada de “Claytor”. Então para que o simulador funcione adequadamente aos quatro sistemas IEEE de teste é necessário a adaptação da matriz de dados de barra (matrizSystem). A solução adotada foi expandir a coluna de nome reinserindo, onde o nome é simples, o número de identificação da barra de modo a garantir que todos as linhas da tabela de dados de barra contenham as mesmas quantidades de dados e de espaços vazios. Deste modo, no exemplo acima, a barra 2

ganha um número de identificação “Claytor 2” enquanto a barra 1 se mantém “Glen Lyn”.

Figura 18: Atualização das matrizes do sistema - matrizSystem

Fonte: autoria própria.

Outra adaptação que é feita imediatamente após a leitura e formação das tabelas é a equivalência de circuitos de múltiplos a um único circuito pela associação das impedâncias das linhas em paralelo. Deste modo, a tabela de dados de ramo matrizSystem2 se reajusta de modo a unificar as linhas identificadas com circuitos em paralelo, no caso genérico é a linha entre a barra 1 e 2, conforme descrito na seção sobre modelagem de linhas de transmissão.

Figura 19: Atualização das matrizes do sistema - matrizSystem2

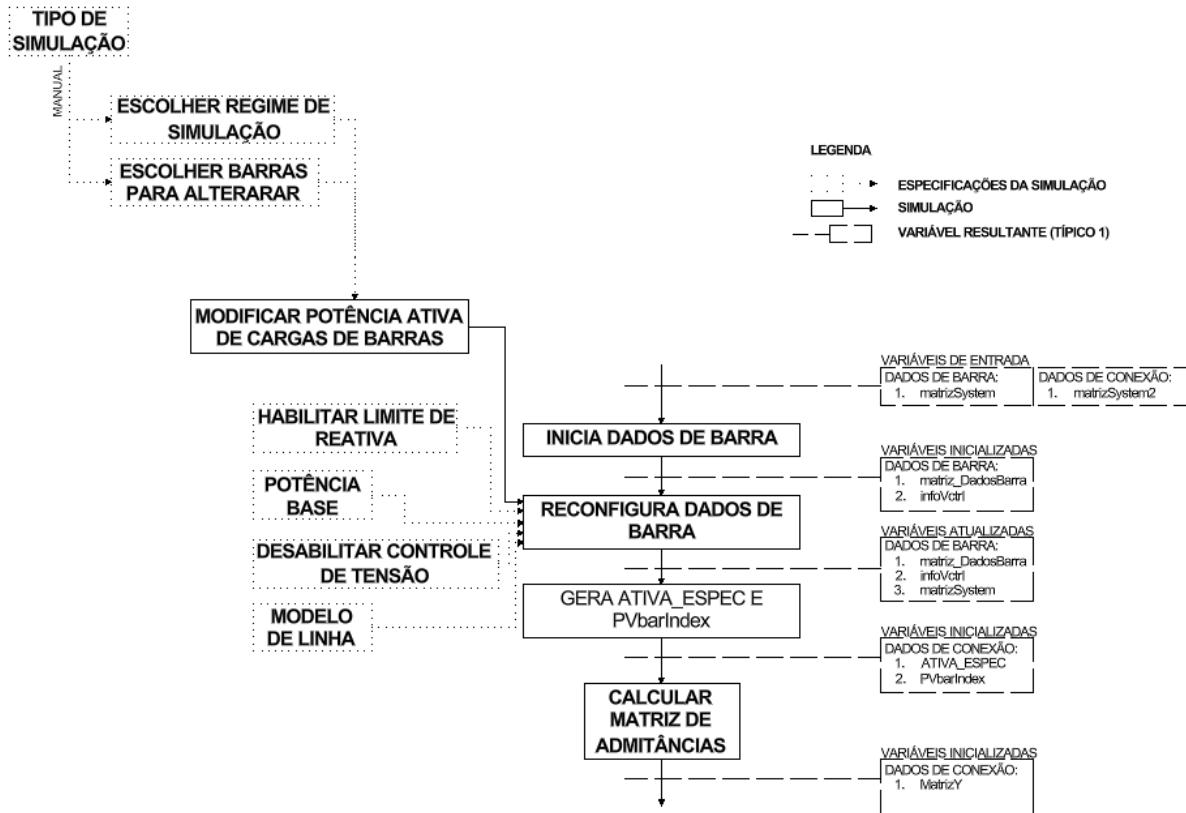
Fonte: autoria própria.

4.3 Modelagem de Rede

4.3.1 Considerações Iniciais

Em sequência, junto a mais especificações de entrada, os dados são processados de modo a modelar o sistema como será utilizado pelos algoritmos do Power Flow. Os sub-blocos que compõe esta seção encontram-se resumidamente no diagrama da Figura 20. O primeiro sub-bloco de funções é responsável por resumir as principais características a serem utilizadas pelos algoritmos do fluxo de potência em duas listas: *matriz_DadosBarra*, *infoVctrl*. Ambas listas são construídas de modo a agregar as principais informações como podem ser visualizadas na Figura 21.

Figura 20: Módulos de modelagem de rede



Fonte: autoria própria.

Figura 21: Principais Características de Barra.

	B _{sh}	Carga ativa (MW)	Carga reativa (MVar)	Habilitar limite de reativa	limite inferior (MVA)	limite superior (MVA)	gerador de ativa	Potência de geração ativa (MW)	
n					Q _{min}	Q _{max}	"Y"	P _{ger}	
t	0	0	0	"Y"	Q _{min}	Q _{max}	"N"	0	
m	0	-P _L	-Q _L	"Y"	Q _{min}	Q _{max}	"Y"	P _{ger}	NB

matriz_DadosBarra^T

	Info de barra	Tensão espec. (pu)
n	'swing'	v _n _{ctrl}
t	'CS'	v _t _{ctrl}
m	'G'	v _m _{ctrl}

infoVctrl^T NB

Fonte: autoria própria.

O segundo sub-bloco é responsável por remodelar as informações a depender das especificações: *Tipo de Simulação*, *Regime de Simulação*, *Barras a alterar*, *Habilitar Limite*, *Potência Base*, *Desabilitar CS*, *Modelo de Linha*. Os três primeiros parâmetros, isto é, *Tipo de Simulação*, *Regime de Simulação*, *Barras a alterar* são **não obrigatórios** e depende se o *Tipo de Simulação* for **manual**. O controle permite modificar as potências ativas de cargas específicas e realizar outras simulações aquém do padrão dos arquivos CDF. Já as quatro demais especificações, isto é, *Habilitar Limite*, *Potência Base*,

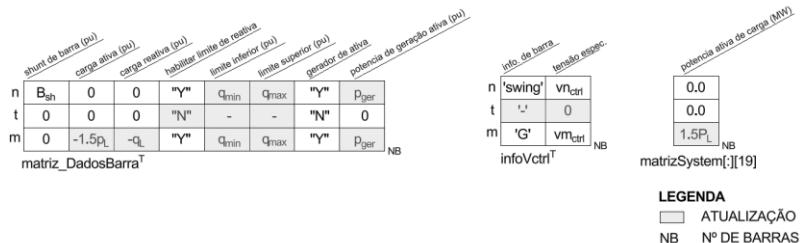
Desabilitar CS, Modelo de Linha são obrigatorias para a simulação. A lista completa de todos as especificações do estudo pode ser vista na Tabela X. Todas estas reconfigurações levam a atualizações nas Listas, por exemplo se forem escolhidos os parâmetros conforme a Tabela 2 as listas *matriz_DadosBarra*, *infoVctrl* e *matrizSystem* devem se alterar conforme a Figura 22.

Tabela 2: Especificações dos parâmetros de entrada para o caso 3 barras

<i>Tipo de Simulação</i>	Manual
<i>Regime de Simulação</i>	Pesado
<i>Barras a alterar</i>	3*50
<i>Habilitar Limite</i>	Y
<i>Potência Base (MW)</i>	100
<i>Modelo de Linha</i>	PI

Fonte: autoria própria.

Figura 22: Principais Características de Barra - Atualizações relevantes



Fonte: autoria própria.

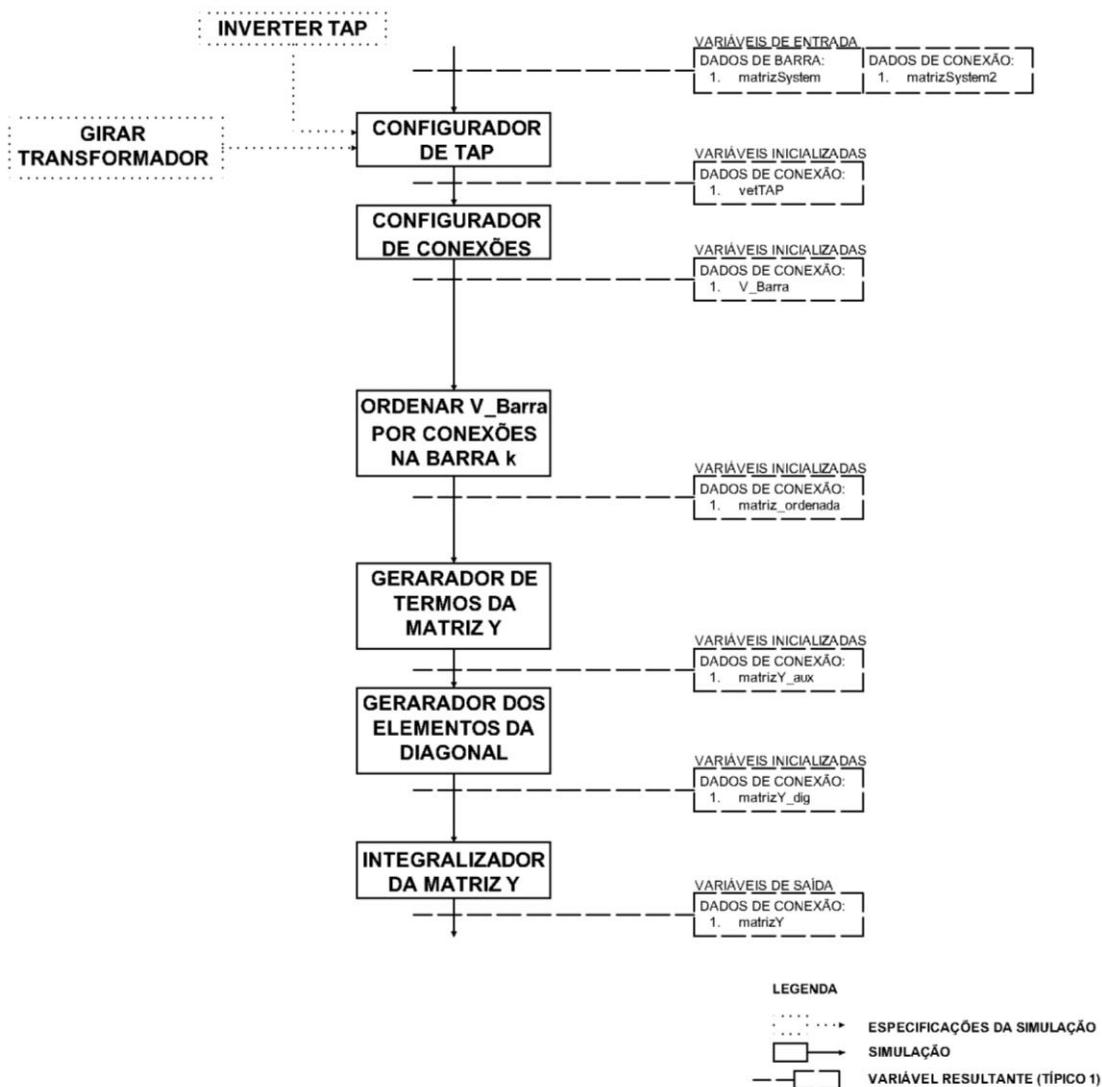
4.3.2 Matriz de Admitâncias – Matriz Y

A matriz de Admitâncias (Ou Matriz Y) é basicamente uma função da topologia da transmissão. Sendo assim, a principal tabela de dados para o seu cálculo é *matrizSystem2* que traz as informações dos ramos entre as barras. Como já mencionado, é uma matriz quadrada de mesma ordem que a quantidade de barras do sistema (NB), onde os elementos da diagonal principal são determinados por uma lei de formação enquanto os elementos das submatrizes triangulares superior e inferior possuem outra. É simétrica quando não considerado efeitos de defasagem angular dos transformadores o que simplifica os cálculos. A Figura 23 que traz os principais sub-blocos de funções que compõe as funções para a determinação desta matriz.

Os dois principais parâmetros que devem ser especificados para este cálculo é o “Inverter TAP” e o “Girar Transformador”. A Tabela 3 mostra os impactos destes parâmetros na relação de transformação e em como se considera os transformadores nas

simulações. Estes parâmetros tem por objetivo ajustar os TAP's dos transformadores de modo a refletir a realidade do sistema. Então é iniciado o vetor *vetTAP* e a lista *V_Barra* contendo as principais informações dos ramos em ambos os sentidos como é mostrado na Figura 24. A função “**Gerador dos elementos da diagonal**” entra em ação para determinar os elementos da diagonal da Matriz Y, somando-se os temos indicados na segunda coluna da lista *MatrizY_aux* por cada barra conforme Figura 25. Por fim é consolidada a Matriz de Admitâncias rearranjando os elementos como segue a Figura 26.

Figura 23: Módulos para a determinação da Matriz de Admitâncias



Fonte: autoria própria.

Tabela 3: Configurações do TAP dos Transformadores.

GIRAR TRANSFORMADOR	INVERTER TAP	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA	COMENTÁRIOS
NÃO	NÃO		$\text{tap}_{lm} = 1$ $\text{tap}_{mt} = a$ Configuração normal dos sistemas IEEE 9, 14 e 30 Barras.
SIM	NÃO		$\text{tap}_{lm} = a$ $\text{tap}_{mt} = 1$
NÃO	SIM		$\text{tap}_{lm} = 1$ $\text{tap}_{mt} = 1/a$
SIM	SIM		$\text{tap}_{lm} = 1/a$ $\text{tap}_{mt} = 1$ Configuração normal do sistema IEEE 118.

Fonte: autoria própria.

Figura 24: Principais Características de Linha

		DE	resistência do elemento de ramo (pu)	resistência do elemento de ramo (pu)	TAP	PARA
$n \rightarrow t$	n	r_{ln}	x_{ln}	b_{sh}	0	t
$t \rightarrow m$	t	r_{lm}	x_{lm}	0	tap_{lm}	m
$m \rightarrow t$	m	r_{lm}	x_{lm}	0	tap_{mt}	t
$t \rightarrow n$	t	r_{ln}	x_{ln}	b_{sh}	0	n

$2 \times \text{dim}(\text{matrizSystem2})$

V_{Barra}

		vetTAP
$n \rightarrow t$	t	0
$t \rightarrow m$	m	tap_{lm}
$m \rightarrow t$	t	tap_{mt}
$t \rightarrow n$	n	0

$2 \times \text{dim}(\text{matrizSystem2})$

Fonte: autoria própria.

Figura 25: Lista Auxiliar para a Matriz de Admitâncias

		DE	termo para a diagonal principal	termo para demais elementos	PARA
$t \rightarrow m$	t	$\text{tap}_{lm}^2 \cdot y_{lm}$	$-\text{tap}_{lm} \cdot y_{lm}$	m	
$t \rightarrow n$	t	$\frac{1}{2} b_{sh} + y_{ln}$	$-y_{ln}$	n	
$m \rightarrow t$	m	$\text{tap}_{mt}^2 \cdot y_{lm}$	$-\text{tap}_{mt} \cdot y_{lm}$	t	
$n \rightarrow t$	n	$\frac{1}{2} b_{sh} + y_{ln}$	$-y_{ln}$	t	

$2 \times \text{dim}(\text{matrizSystem2})$

matrizY_aux

Fonte: autoria própria.

Figura 26: Matriz de Admitâncias - Sistema 3 barras genérico

matrizY			
n	$\frac{1}{2} b_{sh} + y_{ln} + B_{sh}$	$-y_{ln}$	0
t	$-y_{ln}$	$\text{tap}_{lm}^2 \cdot y_{lm} + \frac{1}{2} b_{sh} + y_{ln}$	$-\text{tap}_{lm} \cdot y_{lm}$
m	0	$-\text{tap}_{mt} \cdot y_{lm}$	$\text{tap}_{mt}^2 \cdot y_{lm}$

$\text{dim}(\text{matrizSystem}) \times \text{dim}(\text{matrizSystem})$

Fonte: autoria própria.

4.3.3 Fluxo de Potência com Controle de Tensão

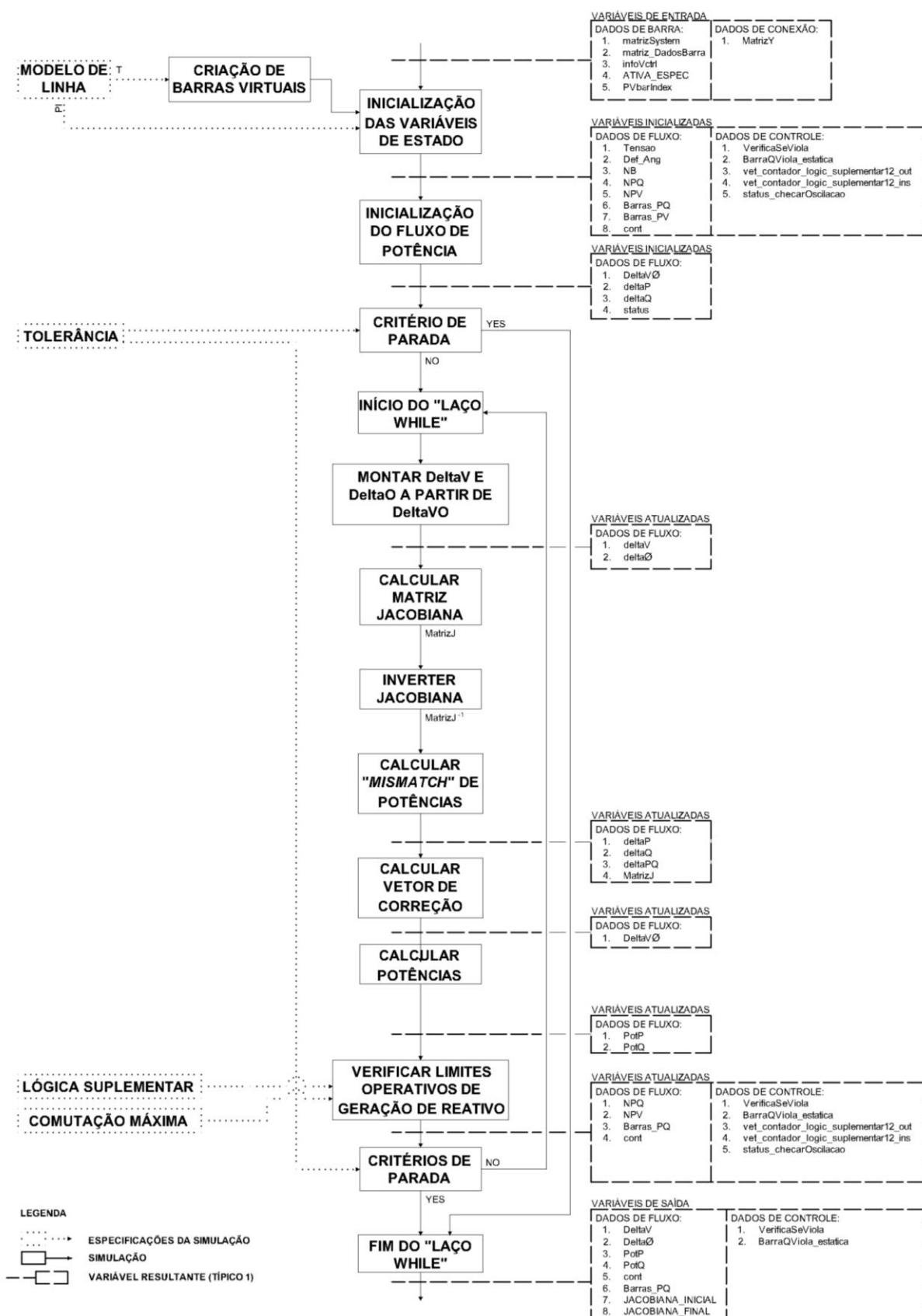
Após a modelagem de rede e de posse da Matriz de Admitâncias os algoritmos então encaminham os dados para o cálculo do Fluxo de Potência com Controle de Tensão por injeção de potência reativa representado pelo fluxograma da figura X.

Inicialmente, procede-se à etapa de inicialização das variáveis de fluxo de potência e de controle do algoritmo iterativo. A variável *cont*, por exemplo, é utilizada para contabilizar o número de iterações realizadas durante o processo de cálculo. Os parâmetros *NB* (número total de barras), *NPQ* (número de barras do tipo PQ) e *NPV* (número de barras do tipo PV) são fundamentais para definir a estrutura do sistema, sendo utilizados na alocação e dimensionamento adequado dos vetores e matrizes envolvidos na resolução do problema. Quando o modelo de linha adotado é o modelo em "T", há a inclusão de barras virtuais no centro das linhas de transmissão, o que implica no aumento da dimensionalidade dos vetores de estado e das matrizes do sistema — conforme descrito na Seção X. Os vetores *Barras_PQ* e *Barras_PV*, por sua vez, são utilizados para identificar dinamicamente o tipo de cada barra do sistema, permitindo o controle individualizado de suas contribuições no modelo. A Figura X apresenta um resumo das principais variáveis inicializadas, ilustrando sua organização para um sistema genérico de três barras, e essas variáveis serão discutidas ao longo do texto conforme sua aplicação.

Figura 27: Principais variáveis inicializadas para o Fluxo de Potência

DeltaVØ	Tensao/DeltaV (pu)	Def_Ang/DeltaØ (rad)	LEGENDA	
\emptyset_l 0 0 1	n_{ref} vn _{ctrl} t m	n_{ref} 0 t m	NB NPQ NPV cont	NÚMERO DE BARRAS NÚMERO DE BARRAS TIPO PQ NÚMERO DE BARRAS TIPO PV CONTADOR DE ITERAÇÕES DO "LAÇO WHILE"
				NB = 3 NPQ = 1 NPV = 1 cont = 0
				n_{ref} "swing" t "Y" m "N"
				n_{ref} "swing" t "N" m "Y"
deltaP	deltaQ	status	Barras_PQ	Barras_PV
n_{ref} t m	n_{ref} t m	n_{ref} 'prosseguir' 'prosseguir' 'prosseguir'	n_{ref} t m	n_{ref} t m
NB	NB	NB	NB	NB
vet_contador_logic_suplementar12_out	vet_contador_logic_suplementar12_ins	status_verificarOscilacao	VerificaSeViola	BarraQViola_estatica
n_{ref} t m	n_{ref} t m	n_{ref} t m	n_{ref} t m	n_{ref} t m
dim(matrizSystem)	dim(matrizSystem)	dim(matrizSystem)	dim(matrizSystem)	dim(matrizSystem)

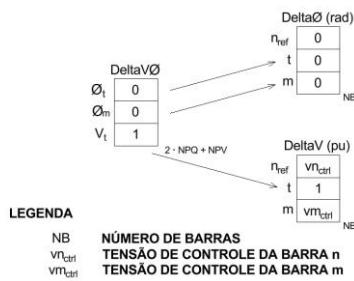
Figura 28: Módulos para a determinação do Fluxo de Potência



Fonte: autoria própria.

O processo de cálculo do fluxo de potência tem início dentro de um laço while, o qual executa iterativamente até que seja atingido um dos critérios de parada estabelecidos. O primeiro sub-bloco funcional é responsável por decompor o vetor de correções $\Delta V\theta$ — ilustrado na Figura 29 e análogo ao vetor ΔX do subitem 3.6.3 **Apresentação ao algoritmo do Power Flow** - retornando separadamente os vetores de correção para módulo de tensão (ΔV ou $Tensao$) e ângulo ($\Delta \theta$ ou Def_Ang). Com esses vetores atualizados e com base nas características elétricas do sistema, procede-se ao cálculo da matriz Jacobiana ($MatrizJ$), conforme detalhado no subitem 3.6.2 **Jacobiana do Power Flow**.

Figura 29: Extração de Tensão e Angulo do vetor de correções



Fonte: autoria própria.

A partir daí, o vetor de correções ΔX ($\Delta V\theta$) pode ser recalculado e também as potências líquidas injetadas em cada barra, $PotP$ e $PotQ$. Esses valores atualizados são então utilizados em duas etapas fundamentais: a verificação dos critérios de convergência e a avaliação do cumprimento dos limites operacionais das máquinas geradoras quanto à potência reativa.

4.3.3.1 Cálculo da Matriz Jacobiana

A matriz Jacobiana foi implementada com base na formulação tradicional do método de Newton-Raphson para análise de fluxo de potência em sistemas elétricos, sendo estruturada em quatro blocos principais: H (derivadas de potência ativa em relação ao ângulo da tensão), N (derivadas de potência ativa em relação ao módulo da tensão), M (derivadas de potência reativa em relação ao ângulo da tensão) e L (derivadas de potência reativa em relação ao módulo da tensão). O algoritmo percorre todas as combinações relevantes de barras do sistema, computando os elementos da Jacobiana a

partir das equações parciais deduzidas do modelo da matriz de admitância (Matriz Y). A construção da matriz inclui condicionamentos específicos para garantir coerência dimensional e numérica: os blocos M e L são formados exclusivamente quando há a presença de barras do tipo PQ, evitando a inclusão indevida de equações associadas à potência reativa em barras do tipo PV. Esse tratamento condicional assegura que o sistema linear resultante esteja corretamente dimensionado, com número de equações e variáveis coerente, promovendo a estabilidade numérica do método iterativo. O algoritmo 1 que pode ser consultado no Apêndice B deste trabalho, descreve a formação iterativa da matriz Jacobiana.

4.3.3.2 Cálculo dos Mismatch de Potências

O cálculo dos Mismatch de potência, por sua vez, foi desenvolvido para refletir a diferença entre as potências especificadas (carga e geração) e as potências efetivamente injetadas em cada barra:

- Para a potência ativa, o algoritmo considera todas as barras, exceto a barra slack, e calcula o desbalanço com base nas contribuições de condutância e susceptância da matriz Y.
- Já para a potência reativa, apenas as barras do tipo PQ são efetivamente consideradas no vetor de Mismatch, conforme prática usual.

Adicionalmente, foram implementados intertravamentos lógicos para tratar o comportamento das barras PV com controle de tensão: caso a barra esteja violando seus limites de potência reativa (identificados por meio do vetor *VerificaSeViola*), o algoritmo ajusta a potência reativa esperada utilizando os valores de limite inferior ou superior, conforme o tipo de violação. Quando não há violação, o *Mismatch* de potência reativa (Q) da barra PV é forçado a zero, refletindo a premissa de que a tensão está sendo regulada e o valor de Q está dentro dos limites admissíveis. Essa abordagem garante a formação consistente do vetor de mismatches e sua compatibilidade com a estrutura da Jacobiana. O algoritmo 2 que pode ser consultado no Apêndice B deste trabalho, descreve a formação iterativa dos *mismatch* de potências.

4.3.3.3 Verificações de limites operativos de geração de reativo.

As verificações de limites operativos apenas iniciam após 2 ciclos de cálculo ($cont > 1$), pois assim as respostas das tensões e ângulos já estão parcialmente convergidas aos valores efetivos antes de confirmar e eventualmente trocar o tipo de barra e o que possibilita uma melhor convergência dos cálculos. Vide o algoritmo 3 no Apêndice B.

Após isto, é efetivamente determinada a verificação de extração de limites para aquelas barras que possuem limites operativos de reativos não violados (barras PV). Toda verificação está calcada nas comparações:

- Se $Q_{gen} < Q_{min}$ então a tensão calculada deverá ser maior que a tensão de controle, isto é: $V_n > V_{espec}$.
- Se $Q_{gen} > Q_{máx}$ então a tensão calculada deverá ser menor que a tensão de controle, isto é: $V_n < V_{espec}$.

Deste modo, a primeira etapa desta parte do código inicia-se com a potência reativa gerada na barra PV calculada na iteração $cont$ é confrontada com os limites operativos da máquina indicados nas linhas 4 e 5 da *matriz_DadosBarra*. Caso haja violação de algum dos limites operativos na barra k , seis das principais variáveis devem ser alterados de modo a representar a mudança de classificação de barra adequadamente – estado PQ : NPV reduz uma unidade; NPQ aumenta uma unidade; a lista de controle *Barras_PQ* para a barra k recebe “Y”; o vetor *BarraQViola* armazena a barra k violada; o vetor *VerificaSeViola* armazena qual dos limites foi violado (o mínimo ou máximo), e por fim; *DeltaVθ* é redimensionado de modo a incluir a tensão da nova barra PQ . A segunda etapa do código confirma a coerência entre as tensões calculadas e especificadas e se houver divergência, ela volta com as variáveis ao estado anterior (estado PV).

Para minimizar os impactos das Divergências, algumas das tratativas proposta por Zhao et al. em [10] é fazer um controle da quantidade de trocas de tipo de barra para as barras identificadas como *Barras de identificação difícil* como proposta na terceira etapa do fluxograma. No processo de cálculo do fluxo de potência, Zhao et al. propõem **lógicas suplementares** para lidar com o problema das trocas excessivas de tipo de barra (de PV para PQ) durante as iterações. A Lógica Suplementar 1 estabelece que, se o

número de trocas de tipo PV para PQ em uma determinada barra ultrapassar um limite *comutação_máxima* (por exemplo, *comutação_máxima* = 3), essa barra será fixada definitivamente como PQ nas iterações seguintes, sem mais verificações do critério de troca. Embora isso permita encontrar uma solução, busca-se minimizar o número de barras afetadas por essa lógica. Para isso, a Lógica Suplementar 2 melhora o processo ao fixar apenas uma barra de difícil identificação por iteração — geralmente a barra que mais viola os limites operacionais —, deixando as demais livres para ajustes. Essa abordagem tem a vantagem de evitar fenômenos numéricos do tipo “ziguezague” nas iterações, embora aumente o número total de iterações necessárias.

4.3.3.4 Critérios de Parada

Há três critérios de parada do laço “while”: fluxo concluído com êxito; fluxo indeterminado; fluxo divergente. O fluxo é concluído com êxito quando a tolerância para os Mismatch de potências ativa e reativa calculadas no processo (*deltaPQ*) é atingido dentro de um limite máximo de iterações especificadas (default de 200 iterações máxima); é indeterminado quando atinge o limite máximo de iterações sem atingir o critério de tolerância para todas as potências, e; é divergente quando as tensões e ângulos de defasagens crescem acima de um valor determinado (default de “1000pu” e “1000rad” respectivamente).

4.3.3.5 Fim do laço “while”

No fim do laço “while” há o empacotamento final dos dados de saída que serão encaminhados para o analisador final. Isto inclui as tensões e ângulos de defasagem (*DeltaV* e *Deltaθ*), as potências líquidas ativa e reativa calculadas no processo (*PotP*, *PotQ*), a quantidade de iterações (*cont*), a configuração final das barras (*Barras_PQ*), e os valores das Jacobianas de duas iterações relevantes feito a inicial e a final *JACOBIANA_INICIAL* e *JACOBIANA_FINAL*.

Outros dados relevantes que também são emitidos são as informações de violação de limites dados por intermédio de duas variáveis como a *BarraQViola* e

VerificaSeViola onde a primeira salva o índice da barra que tem o limite violado enquanto a segunda salva qual dos limites foi violado.

4.4 Analisador Final

4.4.1 Considerações Iniciais

Todos os dados de entrada e possíveis combinações dos estudos estão sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4: GoSimul - Resumo das características dos estudos que podem ser realizados

ENTRADA	TIPO DA ENTRADA	COMENTÁRIOS
<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	1. ieee9_Marcelo.cdf 2. ieee14.cdf 3. ieee30.cdf 4. ieee118.cdf	<ul style="list-style-type: none"> O sistema IEEE 9 barras possui como referência o trabalho de X.
<i>TIPO DE SIMULAÇÃO</i>	1. Automático 2. Manual	<ul style="list-style-type: none"> “Automático” é a opção que não altera as potências do arquivo CDF. “Manual” é uma opção para alterar as potências ativas das cargas.
<i>ESCOLHER REGIME DE SIMULAÇÃO</i>	1. Leve 2. Pesado 3. Ambos	<ul style="list-style-type: none"> Somente se “Manual”. Se “Automático” é indiferente o que preenche.
<i>BARRAS PARA ALTERAR</i>	1. “1-5*45” 2. “1-2*20_5-8*45”	<ul style="list-style-type: none"> Somente se “Manual”. “1-5*45” significa que o estudo é composto das barras de 1 a 5 aplicando 45% de carga em cada uma. “1-2*20_5-8*45” significa que o estudo é composto das barras de 1 a 2 com variação percentual de 20% e de 5 a 8 com variação de 45%.
<i>HABILITAR LIMITE DE REATIVO</i>	1. Desabilitar 2. Habilitar	<ul style="list-style-type: none"> Para corresponder ao TCC do trabalho X deve ser desabilitada esta opção (ou aumentar os limites da geração)
<i>INVERTER TAP</i>	1. Não 2. Sim	
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	1. Não 2. Sim	
<i>POTÊNCIA BASE (MW)</i>	100	
<i>DESABILITAR CONTROLE DE TENSÃO</i>	1. Não 2. Sim	
<i>MODELO DE LINHA</i>	1. PI 2. T	
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	1. None 2. Logica Suplementar 1 3. Logica Suplementar 2	<ul style="list-style-type: none"> Lógica suplementar 0 significa sem lógica suplementar. Lógica suplementar 1 impede a comutação máxima de todas as barras de difíceis identificação. Lógica suplementar 2 impede a comutação máxima apenas da primeira barra de difícil identificação detectada.
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	-	
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001	

Fonte: autoria própria.

Para apresentação dos resultados é importante salientar que os erros doravante calculados se referem ao erro absoluto, isto é, E_{abs_k} representa o erro absoluto calculado para um ponto E_k em relação ao ponto de referência E_0 conforme equação 58.

$$E_{abs_k} = \frac{|E_k - E_0|}{\text{máximo}|E_{\Omega_k}|} \quad (58)$$

Onde:

E_{abs_k} : Erro absoluto calculado para um ponto k (tensão ou ângulo).

E_0 : Representa o ponto de referência.

E_{Ω_k} : Representa todo o conjunto de pontos k.

Durante as simulações e fluxos de potências são armazenados dados como a evolução da tensão em relação ao contador de iterações (*cont*); a evolução das defasagens angulares, dos mismatches de potências ativa e reativa todos com relação ao contador de iterações também serão armazenados e mostrados conforme a necessidade. As figuras desenvolvidas no Python utilizam uma série de bibliotecas capazes de mostrar os dados da legenda ao passar o mouse sobre as curvas além de providenciar um filtro na própria figura para os casos de maiores quantidades de barras como os sistemas IEEE 30 e IEEE 118. A lista com todas as bibliotecas utilizadas pode ser consultada na [seção X](#).

Durante as simulações e os cálculos de fluxo de potência, são armazenados diversos dados relevantes, como a evolução da magnitude da tensão e das defasagens angulares de cada barra em função do número de iterações (variável *cont*), bem como as evoluções dos mismatches de potência ativa e reativa. Esses dados são registrados e podem ser exibidos conforme a necessidade analítica.

As figuras geradas em Python utilizam um conjunto de bibliotecas que oferecem recursos interativos, como a exibição dinâmica das legendas ao posicionar o cursor sobre as curvas. Além disso, foi implementado um sistema de filtragem diretamente nas figuras, especialmente útil para sistemas com grande número de barras, como os sistemas IEEE de 30 e 118 barras. A relação completa das bibliotecas utilizadas encontra-se na [Seção X](#).

4.4.2 Resultados do GoSimul - IEEE 9 Barras

As configurações para obtenção dos dados conforme os resultados de referências dos arquivos CDF são dadas pela Tabela 5 abaixo. Para fins de comparação

de resultados, as configurações de potências de cargas e de geração do sistema IEEE 9 Barras é a mesma utilizada pelo Marcelo em seu trabalho de conclusão de curso apresentado em [11] – consulte o Apêndice A. As Tabela 6 e Tabela 7 sintetizam os resultados obtidos tanto para fluxo quanto para geração. É importante salientar que o sistema IEEE 9 Barras como estudado em [11] não deve possuir verificações de limites de reativo ou foi realizado com limites suficientemente grandes para não haver trocas de tipo de barras.

Tabela 5: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 9 Barras

<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	ieee9_Marcelo.cdf
<i>TIPO DE SIMULAÇÃO</i>	Automático
<i>ESCOLHER REGIME DE SIMULAÇÃO</i>	leve ou pesado
<i>BARRAS PARA ALTERAR</i>	–
<i>HABILITAR LIMITE DE REATIVO</i>	Desabilitar
<i>INVERTER TAP</i>	Não ou Sim
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	Não ou Sim
<i>POTÊNCIA BASE</i>	100
<i>DESABILITAR CONTROLE DE TENSÃO</i>	Não
<i>MODELO DE LINHA</i>	PI
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	None
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	–
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001

Fonte: autoria própria.

Tabela 6: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 9 Barras

Ind.	TENSÃO - GoSimul (pu)	ÂNGULO -GoSimul (pu)	TENSÃO - CDF (graus)	ÂNGULO -CDF (graus)	ERRO ABS. DA TENSÃO (%)	ERRO ABS. DO ÂNGULO (%)	TENSÃO DE CTRL.
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,00	0,00	1,0000
2	1,0000	9,6689	1,0000	9,6700	0,00	0,01	1,0000
3	1,0000	4,7711	1,0000	4,7700	0,00	0,02	1,0000
4	0,9870	-2,4067	0,9870	-2,4100	0,00	0,09	–
5	0,9754	-4,0173	0,9750	-4,0200	0,04	0,07	–
6	1,0034	1,9256	1,0030	1,9300	0,04	0,12	–
7	0,9856	0,6216	0,9860	0,6200	0,04	0,04	–
8	0,9962	3,7992	0,9960	3,8000	0,02	0,02	–
9	0,9576	-4,3500	0,9580	-4,3500	0,04	0,00	–

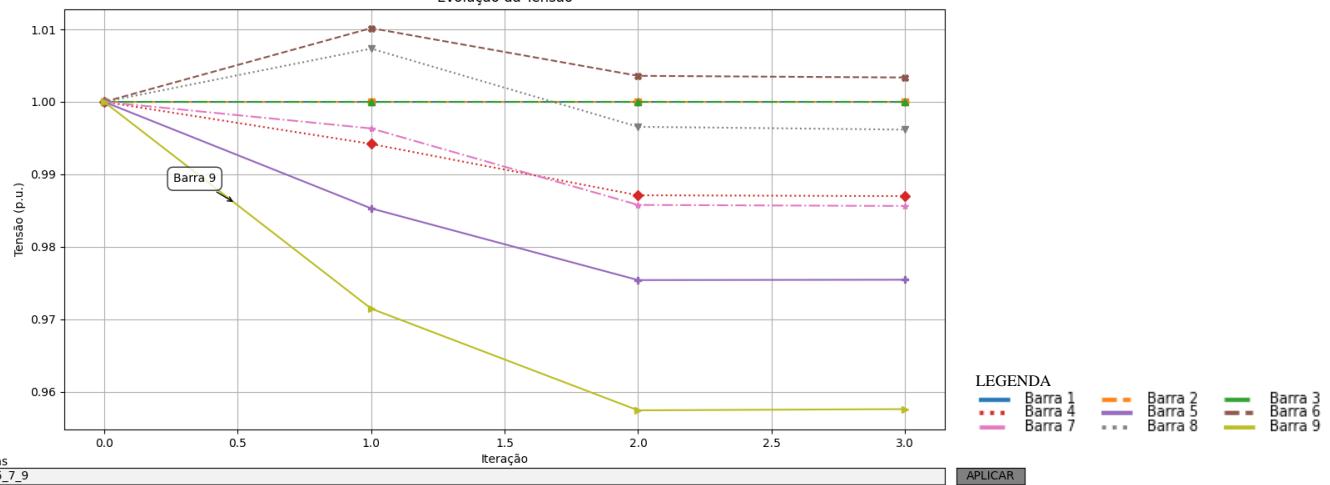
Fonte: autoria própria.

Tabela 7: GoSimul - Resultados de Geração para IEEE 9 Barras

Ind.	POT. ATIVA (P) GERADA/CONS. (pu)	POT. REATIVA (Q) GERADA/CONS. (pu)	LIMITE Qmin (pu)	LIMITE Qmáx (pu)	TIPO DE BARRA (INICIAL)	TIPO DE BARRA (FINAL)
1	0,7196	0,2410	–	–	Swing	Swing
2	1,6300	0,1449	-0,4	0,5	PV	PV
3	0,8500	-0,0363	0	0,4	PV	PV
4	0,0000	-0,0001	–	–	PQ	PQ
5	-0,9000	-0,3001	–	–	PQ	PQ
6	0,0000	0,0000	–	–	PQ	PQ
7	-1,0000	-0,3502	–	–	PQ	PQ
8	0,0000	0,0000	–	–	PQ	PQ
9	-1,2500	-0,5003	–	–	PQ	PQ

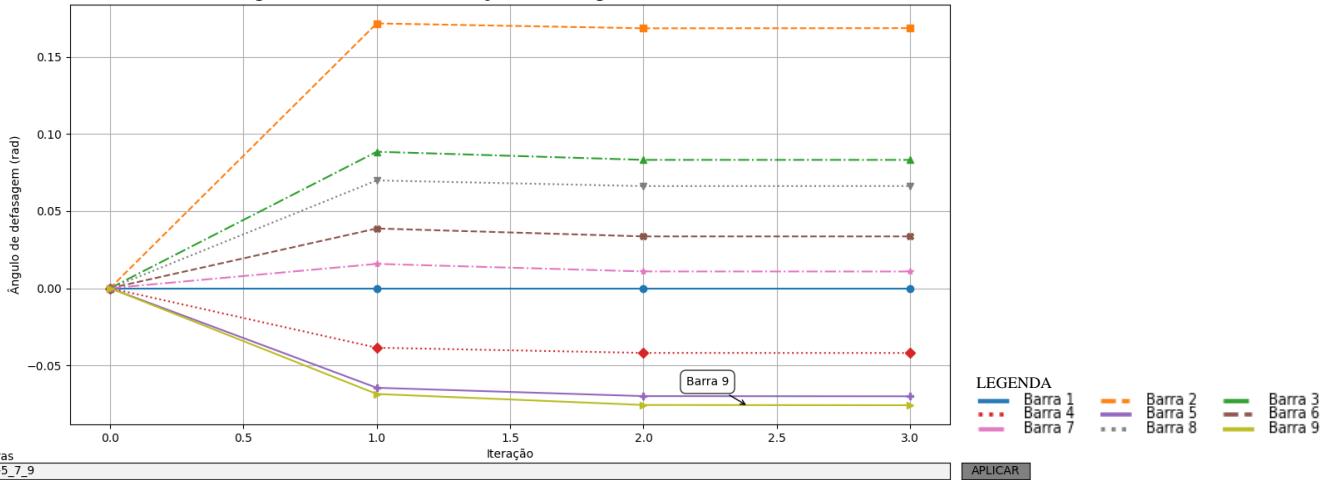
Fonte: autoria própria.

Figura 30: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 9 Barras



Fonte: autoria própria.

Figura 31: GoS - Evolução dos ângulos de defasagem das barras do sistema IEEE 9 Barras



Fonte: autoria própria.

4.4.3 Resultados do GoSimul - IEEE 14 Barras

As configurações para obtenção dos dados conforme os resultados de referências do arquivo CDF são dadas pela Tabela 8 abaixo. As Tabela 9 e Tabela 10 sintetizam os resultados obtidos tanto para fluxo quanto para geração.

Tabela 8: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 14 Barras

<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	ieee14.cdf
<i>TIPO DE SIMULAÇÃO</i>	Automático
<i>ESCOLHER REGIME DE SIMULAÇÃO</i>	leve ou pesado
<i>BARRAS PARA ALTERAR</i>	-
<i>HABILITAR LIMITE DE REATIVO</i>	Habilitar
<i>INVERTER TAP</i>	Sim
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	Não
<i>POTÊNCIA BASE</i>	100
<i>DESABILITAR CONTROLE DE TENSÃO</i>	Não
<i>MODELO DE LINHA</i>	PI
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	None
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	–
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001

Fonte: autoria própria.

Tabela 9: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 14 Barras

Ind.	TENSÃO - GoSimul (pu)	ÂNGULO - GoSimul (pu)	TENSÃO - CDF (graus)	ÂNGULO - CDF (graus)	ERRO ABS. DA TENSÃO (%)	ERRO ABS. DO ÂNGULO (%)	TENSÃO DE CTRL.
1	1,0600	0,0000	1,0600	0,0000	0,00	0,00	1,0600
2	1,0450	-4,9826	1,0450	-4,9800	0,00	0,02	1,0450
3	1,0100	-12,7251	1,0100	-12,7300	0,00	0,03	1,0100
4	1,0177	-10,3129	1,0180	-10,3100	0,03	0,02	–
5	1,0195	-8,7738	1,0200	-8,7700	0,05	0,02	–
6	1,0700	-14,2210	1,0700	-14,2200	0,00	0,01	1,0700
7	1,0615	-13,3596	1,0620	-13,3600	0,05	0,00	–
8	1,0900	-13,3596	1,0900	-13,3600	0,00	0,00	1,0900
9	1,0559	-14,9385	1,0560	-14,9400	0,01	0,01	–
10	1,0510	-15,0972	1,0510	-15,1000	0,00	0,02	–
11	1,0569	-14,7906	1,0570	-14,7900	0,01	0,00	–
12	1,0552	-15,0756	1,0550	-15,0800	0,02	0,03	–
13	1,0504	-15,1563	1,0500	-15,1600	0,04	0,02	–
14	1,0355	-16,0336	1,0360	-16,0300	0,05	0,02	–

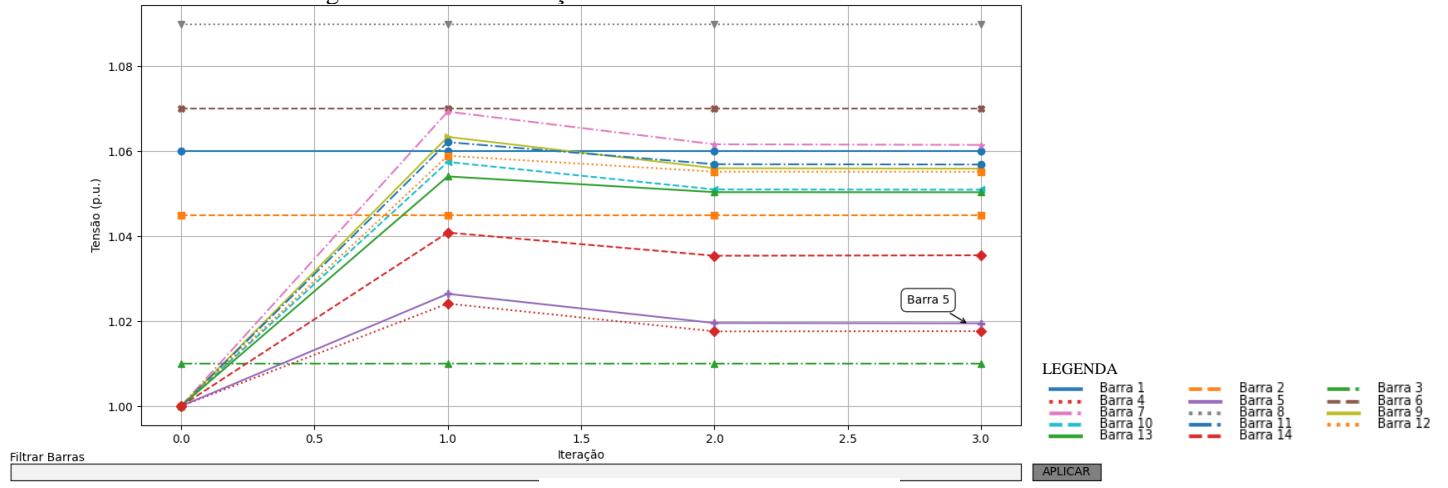
Fonte: autoria própria.

Tabela 10: GoSimul - Resultados de Geração para IEEE 14 Barras

Ind.	POT. ATIVA (P) GERADA/CONS. (pu)	POT. REATIVA (Q) GERADA/CONS. (pu)	LIMITE Qmin (pu)	LIMITE Qmáx (pu)	TIPO DE BARRA (INICIAL)	TIPO DE BARRA (FINAL)
1	2,3239	-0,1655	—	—	Swing	Swing
2	0,4000	0,4356	-0,4	0,5	PV	PV
3	0,0000	0,2508	0	0,4	PV	PV
4	-0,4780	0,0389	—	—	PQ	PQ
5	-0,0760	-0,0160	—	—	PQ	PQ
6	0,0000	0,1274	-0,06	0,24	PV	PV
7	0,0000	0,0000	—	—	PQ	PQ
8	0,0000	0,1763	-0,06	0,24	PV	PV
9	-0,2950	-0,1660	—	—	PQ	PQ
10	-0,0900	-0,0580	—	—	PQ	PQ
11	-0,0350	-0,0180	—	—	PQ	PQ
12	-0,0610	-0,0160	—	—	PQ	PQ
13	-0,1350	-0,0580	—	—	PQ	PQ
14	-0,1490	-0,0500	—	—	PQ	PQ

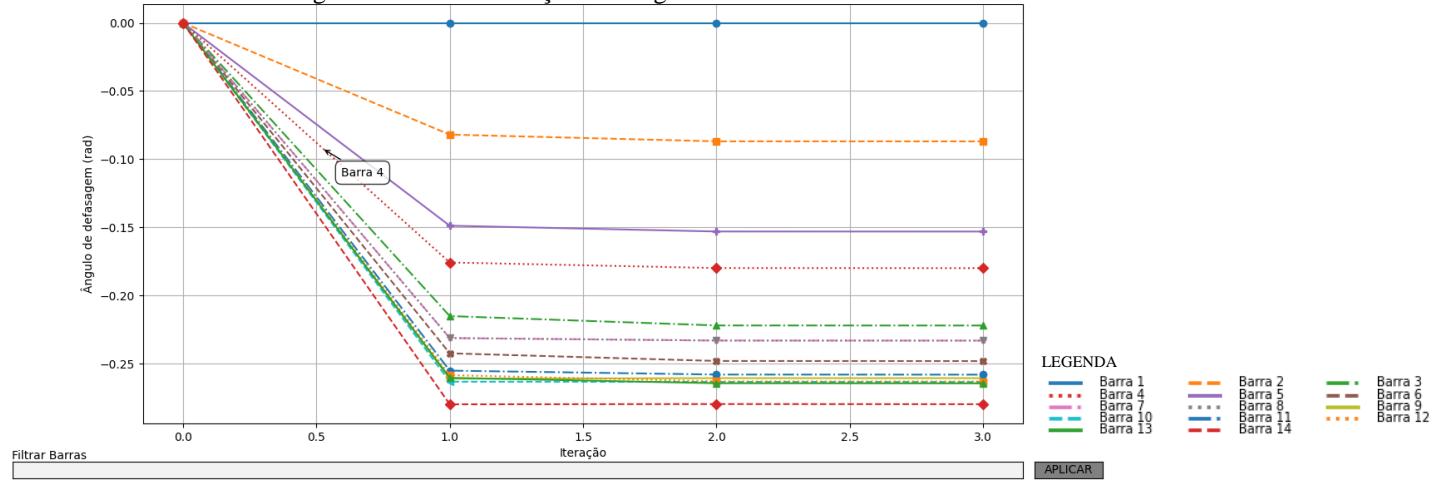
Fonte: autoria própria.

Figura 32: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 14 Barras



Fonte: autoria própria.

Figura 33: GoS - Evolução dos ângulos de fase das barras do sistema IEEE 14 Barras



Fonte: autoria própria.

4.4.4 Resultados do GoSimul - IEEE 30 Barras

No caso do sistema IEEE30, a escolha dos parâmetros não é imediata como foi nos dois sistemas anteriores. A escolha dos parâmetros se dará mediante a diversos testes conforme indicado na Tabela 12. A Tabela 11 resume as características, enquanto as Tabela 13 e Tabela 14 trazem os resultados do estudo.

Os três parâmetros usados para o teste foram *Modelo de Linha*, *Inverter TA* e *Inverter Transformador* são modificados e as variações de tensão e ângulo são comparadas através do cálculo do erro absoluto com as tensões e ângulos de referência do arquivo CDF. Outro ponto relevante para a tomada de decisão é de que a escolha contenha as mesmas barras que ultrapassam o limite de reativo de acordo com o CDF. No caso do sistema IEEE 30 barras, a escolha do modelo de linha "T", "Sim" e "Não" para o *Inverter TAP* e *Inverter Transformador* respectivamente, leva aos melhores resultados de erro máximo absoluto. Este caso ainda agrupa a única que perde o controle de acordo com o arquivo CDF original, isto é, a barra 2 – vide Tabela 12.

Tabela 11: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 30 Barras

<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	ieee30.cdf
<i>TIPO DE SIMULAÇÃO</i>	Automático
<i>ESCOLHER REGIME DE SIMULAÇÃO</i>	leve ou pesado
<i>BARRAS PARA ALTERAR</i>	-
<i>HABILITAR LIMITE DE REATIVO</i>	Habilitar
<i>INVERTER TAP</i>	Sim
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	Não
<i>POTÊNCIA BASE</i>	100
<i>DESABILITAR CONTROLE DE TENSÃO</i>	Não
<i>MODELO DE LINHA</i>	T
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	None
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	-
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001

Fonte: autoria própria.

Tabela 12: Testes para decisão dos parâmetros mais adequados ao IEEE 30 Barras

Não / Sim			INVERTER TAP / INVERTER TRANSFORMADOR			Não / Não			Sim / Não		
Índice	Inicial	Final	Índice	Inicial	Final	Índice	Inicial	Final	Índice	Inicial	Final
13	PV	PQ	1	Swing	PQ	11	PV	PQ	2	PV	PQ
			2	PV	PQ	13	PV	PQ	5	PV	PQ
			5	PV	PQ				8	PV	PQ
			8	PV	PQ						
			11	PV	PQ						
			13	PV	PQ						

PI

Máximo Erro Absoluto											
	Percent.	Barra									
TENSAO	3,77%	12	TENSAO	17,98%	12	TENSAO	7,98%	12	TENSAO	3,71%	30
ÂNGULO	3,62%	8	ÂNGULO	10,23%	3	ÂNGULO	4,56%	3	ÂNGULO	2,91%	3

Índice			Índice			Índice			Índice		
13	PV	PQ	2	PV	PQ	11	PV	PQ	2	PV	PQ
			5	PV	PQ	13	PV	PQ	5	PV	PQ
			8	PV	PQ				8	PV	PQ
			11	PV	PQ						
			13	PV	PQ						

T

Máximo Erro Absoluto											
	Percent.	Barra									
TENSAO	3,77%	12	TENSAO	7,38%	12	TENSAO	7,39%	12	TENSAO	3,31%	30
ÂNGULO	3,77%	8	ÂNGULO	4,53%	3	ÂNGULO	4,53%	3	ÂNGULO	2,61%	28

Fonte: autoria própria.

Tabela 13: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 30 Barras

Ind.	TENSÃO - GoSimul (pu)	ÂNGULO -GoSimul (pu)	TENSÃO - CDF (graus)	ÂNGULO -CDF (graus)	ERRO ABS. DA TENSÃO (%)	ERRO ABS. DO ÂNGULO (%)	TENSÃO DE CTRL.
1	1,0600	0,0000	1,0600	0,0000	0,00	0,00	1,0600
2	1,0408	-5,3319	1,0430	-5,4800	0,20	0,83	1,0450
3	1,0165	-7,5001	1,0210	-7,9600	0,42	2,56	—
4	1,0065	-9,2496	1,0120	-9,6200	0,51	2,06	—
5	1,0082	-14,2208	1,0100	-14,3700	0,17	0,83	1,0100
6	1,0031	-11,0053	1,0100	-11,3400	0,64	1,87	—
7	0,9974	-12,8572	1,0020	-13,1200	0,43	1,46	—
8	1,0028	-11,7595	1,0100	-12,1000	0,67	1,90	1,0100
9	1,0455	-14,1424	1,0510	-14,3800	0,51	1,32	—
10	1,0379	-15,7813	1,0450	-15,9700	0,66	1,05	—
11	1,0820	-14,1424	1,0820	-14,3900	0,00	1,38	1,0820
12	1,0530	-15,0484	1,0570	-15,2400	0,37	1,07	—
13	1,0710	-15,0484	1,0710	-15,2400	0,00	1,07	1,0710
14	1,0372	-15,9498	1,0420	-16,1300	0,44	1,00	—
15	1,0316	-16,0234	1,0380	-16,2200	0,59	1,10	—
16	1,0389	-15,6176	1,0450	-15,8300	0,56	1,18	—
17	1,0332	-15,9509	1,0400	-16,1400	0,63	1,05	—
18	1,0216	-16,6414	1,0280	-16,8200	0,59	1,00	—
19	1,0188	-16,8151	1,0260	-17,0000	0,67	1,03	—
20	1,0228	-16,6146	1,0300	-16,8000	0,67	1,03	—
21	1,0243	-16,2290	1,0330	-16,4200	0,80	1,06	—
22	1,0245	-16,2134	1,0330	-16,4100	0,79	1,10	—
23	1,0179	-16,3959	1,0270	-16,6100	0,84	1,19	—
24	1,0081	-16,5448	1,0210	-16,7800	1,19	1,31	—
25	0,9907	-15,9958	1,0170	-16,3500	2,43	1,97	—
26	0,9726	-16,4387	1,0000	-16,7700	2,53	1,85	—
27	0,9887	-15,3903	1,0230	-15,8200	3,17	2,40	—
28	0,9935	-11,5024	1,0070	-11,9700	1,25	2,61	—
29	0,9681	-16,7095	1,0030	-17,0600	3,23	1,95	—
30	0,9562	-17,6587	0,9920	-17,9400	3,31	1,57	—

Fonte: autoria própria.

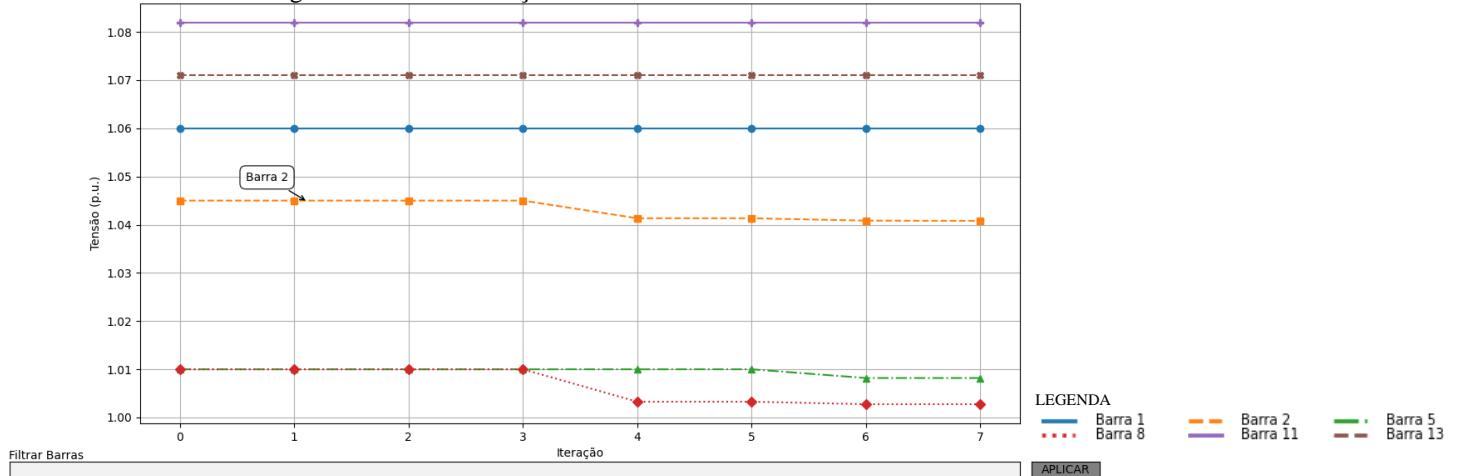
Tabela 14: Resultados de Geração para IEEE 30 Barras

Ind.	POT. ATIVA (P) GERADA/CONS. (pu)	POT. REATIVA (Q) GERADA/CONS. (pu)	LIMITE Qmin (pu)	LIMITE Qmáx (pu)	TIPO DE BARRA (INICIAL)	TIPO DE BARRA (FINAL)
1	2,8627	-0,1001	—	—	Swing	Swing
2	0,4000	0,5000	-0,4	0,5	PV	PQ
3	-0,0240	-0,0120	—	—	PV	PQ
4	-0,0760	-0,0160	—	—	PQ	PQ
5	0,0000	0,4000	-0,4	0,4	PQ	PQ
6	0,0000	0,0000	—	—	PV	PQ
7	-0,2280	-0,1090	—	—	PQ	PQ
8	0,0000	0,4000	-0,1	0,4	PV	PQ
9	0,0000	0,0000	—	—	PQ	PQ
10	-0,0580	-0,0200	—	—	PQ	PQ
11	0,0000	0,1899	-0,06	0,24	PV	PV
12	-0,1120	-0,0750	—	—	PQ	PQ
13	0,0000	0,1375	-0,06	0,24	PV	PV
14	-0,0620	-0,0160	—	—	PQ	PQ
15	-0,0820	-0,0250	—	—	PQ	PQ
16	-0,0350	-0,0180	—	—	PQ	PQ
17	-0,0900	-0,0580	—	—	PQ	PQ
18	-0,0320	-0,0090	—	—	PQ	PQ
19	-0,0950	-0,0340	—	—	PQ	PQ

Ind.	POT. ATIVA (P) GERADA/CONS. (pu)	POT. REATIVA (Q) GERADA/CONS. (pu)	LIMITE Qmin (pu)	LIMITE Qmáx (pu)	TIPO DE BARRA (INICIAL)	TIPO DE BARRA (FINAL)
20	-0,0220	-0,0070	—	—	PQ	PQ
21	-0,1750	-0,1120	—	—	PQ	PQ
22	0,0000	0,0000	—	—	PQ	PQ
23	-0,0320	-0,0160	—	—	PQ	PQ
24	-0,0870	-0,0670	—	—	PQ	PQ
25	0,0000	0,0000	—	—	PQ	PQ
26	-0,0350	-0,0230	—	—	PQ	PQ
27	0,0000	0,0000	—	—	PQ	PQ
28	0,0000	0,0000	—	—	PQ	PQ
29	-0,0240	-0,0090	—	—	PQ	PQ
30	-0,1060	-0,0190	—	—	PQ	PQ

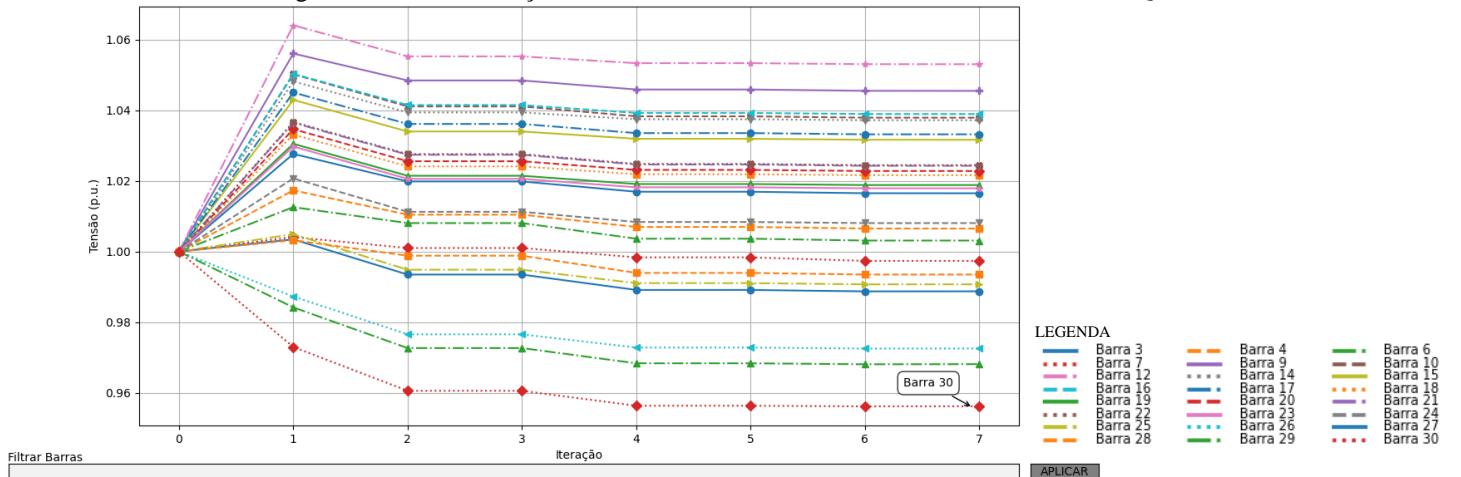
Fonte: autoria própria.

Figura 34: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 30 - Barras PV



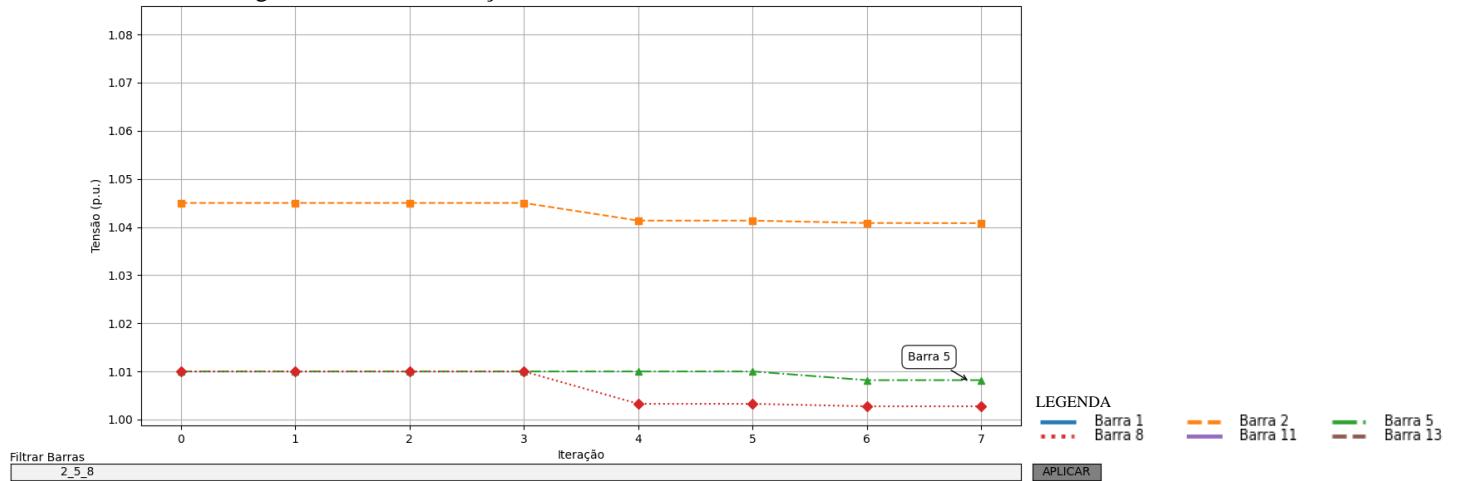
Fonte: autoria própria.

Figura 35: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 30 - Barras PQ



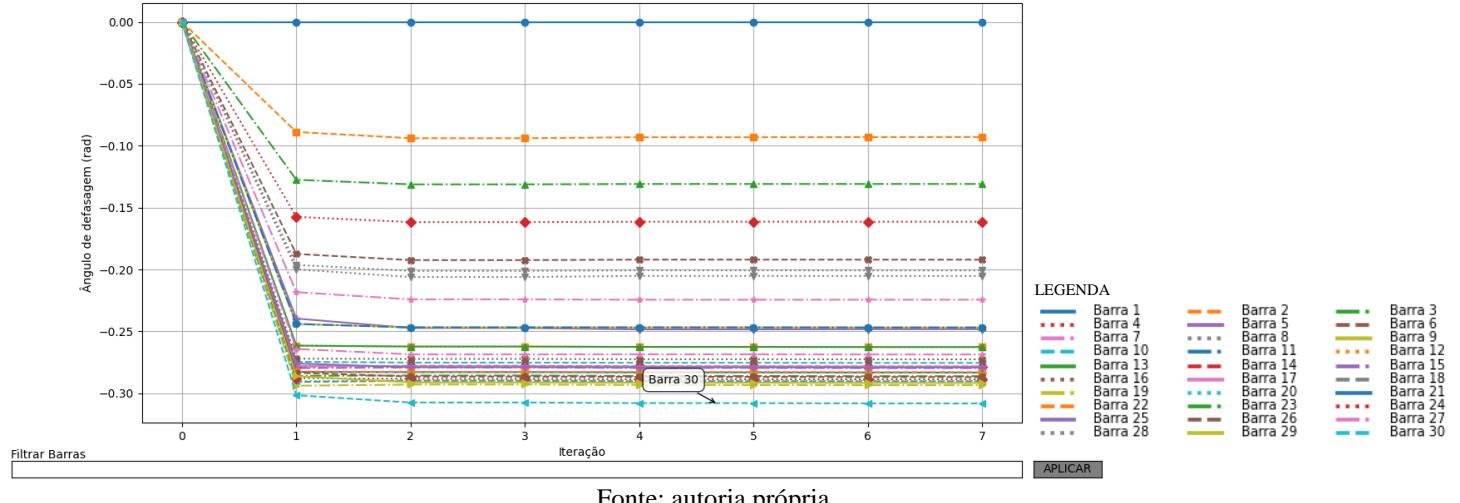
Fonte: autoria própria.

Figura 36: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 30 - Barras Violadas



Fonte: autoria própria.

Figura 37: GoS - Evolução dos ângulos das barras do sistema IEEE 30 Barras



Fonte: autoria própria.

4.4.5 Resultados do GoSimul - IEEE 118 Barras

Para o sistema IEEE 118 Barras, a quantidade de barras que perdem o controle de acordo com o CDF já indica a provável configuração. Isto é, de acordo com o arquivo original, há apenas 5 unidades geradoras com violação de limite de reativo sendo elas as unidades das barras 19, 32, 34, 92 e 103. A escolha do modelo de linha "PI", "Não" e "Sim" para o *Inverter TAP* e *Inverter Transformador* respectivamente é capaz de gerar a melhor aproximação, além de incluir todas as unidades violadas originalmente (veja Tabela 16). A Tabela 15 resume as características, enquanto as Tabela 17 e Tabela 18 trazem os resultados do estudo.

Tabela 15: GoSimul - Configuração Padrão para IEEE 118 Barras

<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	ieee118.cdf
<i>TIPO DE SIMULAÇÃO</i>	Automático
<i>ESCOLHER REGIME DE SIMULAÇÃO</i>	leve ou pesado
<i>BARRAS PARA ALTERAR</i>	-
<i>HABILITAR LIMITE DE REATIVO</i>	Habilitar
<i>INVERTER TAP</i>	Não
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	Sim
<i>POTÊNCIA BASE</i>	100
<i>DESABILITAR CONTROLE DE TENSÃO</i>	Não
<i>MODELO DE LINHA</i>	PI
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	None
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	-
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001

Fonte: autoria própria.

Tabela 16: Testes para decisão dos parâmetros mais adequados ao IEEE 118 Barras

MODELO DE LINHA

			INVERTER TAP / INVERTER TRANSFORMADOR								
Não / Sim			Sim / Sim			Não / Não			Sim / Não		
	Índice	Inicial	Final		Índice	Inicial	Final		Índice	Inicial	Final
PI	19	PV	PQ		15	PV	PQ		15	PV	PQ
	32	PV	PQ		25	PV	PQ		18	PV	PQ
	34	PV	PQ		34	PV	PQ		19	PV	PQ
	62	PV	PQ		36	PV	PQ		25	PV	PQ
	65	PV	PQ		49	PV	PQ		34	PV	PQ
	66	PV	PQ		62	PV	PQ		36	PV	PQ
	92	PV	PQ		65	PV	PQ		59	PV	PQ
	103	PV	PQ		66	PV	PQ		65	PV	PQ
	105	PV	PQ		69	PV	PQ		80	PV	PQ
					70	PV	PQ		92	PV	PQ
					74	PV	PQ		103	PV	PQ
					77	PV	PQ		105	PV	PQ
					80	PV	PQ				
					92	PV	PQ				
					103	PV	PQ				
					105	PV	PQ				
T	1	Swing	PQ		1	Swing	PQ		1	Swing	PQ
	19	PV	PQ		15	PV	PQ		15	PV	PQ
	32	PV	PQ		25	PV	PQ		18	PV	PQ
	34	PV	PQ		34	PV	PQ		19	PV	PQ
	59	PV	PQ		36	PV	PQ		25	PV	PQ
	62	PV	PQ		49	PV	PQ		32	PV	PQ
	65	PV	PQ		62	PV	PQ		34	PV	PQ
	80	PV	PQ		65	PV	PQ		36	PV	PQ
	92	PV	PQ		66	PV	PQ		59	PV	PQ
	103	PV	PQ		69	PV	PQ		65	PV	PQ
	105	PV	PQ		70	PV	PQ		80	PV	PQ
					74	PV	PQ		92	PV	PQ
					77	PV	PQ		103	PV	PQ
					80	PV	PQ		105	PV	PQ
					92	PV	PQ				
					103	PV	PQ				
					105	PV	PQ				

Fonte: autoria própria.

Tabela 17: GoSimul - Resultados de Fluxo para IEEE 118 Barra

Ind.	TENSÃO - GoSimul (pu)	ÂNGULO -GoSimul (pu)	TENSÃO - CDF (graus)	ÂNGULO -CDF (graus)	ERRO ABS. DA TENSÃO (%)	ERRO ABS. DO ÂNGULO (%)	TENSÃO DE CTRL.
1	0,9550	0,0000	0,9550	10,6700	0,00	0,00	0,955
2	0,9714	0,5684	0,9710	11,2200	0,04	0,06	—
3	0,9676	0,9126	0,9680	11,5600	0,04	0,08	—
4	0,9980	4,6842	0,9980	15,2800	0,00	0,26	0,998
5	1,0018	5,1344	1,0020	15,7300	0,02	0,26	—
6	0,9900	2,3848	0,9900	13,0000	0,00	0,19	0,99
7	0,9893	1,9327	0,9890	12,5600	0,03	0,15	—
8	1,0150	10,3531	1,0150	20,7700	0,00	0,87	1,015
9	1,0429	17,6072	1,0430	28,0200	0,01	0,89	—
10	1,0500	25,1881	1,0500	35,6100	0,00	0,85	1,05
11	0,9850	2,0901	0,9850	12,7200	0,00	0,14	—
12	0,9900	1,5618	0,9900	12,2000	0,00	0,11	0,99
13	0,9683	0,6954	0,9680	11,3500	0,03	0,05	—
14	0,9836	0,8260	0,9840	11,5000	0,04	0,01	—
15	0,9700	0,4770	0,9700	11,2300	0,00	0,29	0,97
16	0,9839	1,2381	0,9840	11,9100	0,01	0,01	—
17	0,9950	2,9987	0,9950	13,7400	0,00	0,25	—
18	0,9730	0,7790	0,9730	11,5300	0,00	0,28	0,973
19	0,9634	0,2907	0,9630	11,0500	0,04	0,31	0,962
20	0,9580	1,2060	0,9580	11,9300	0,00	0,19	—
21	0,9585	2,8201	0,9590	13,5200	0,05	0,10	—
22	0,9695	5,4046	0,9700	16,0800	0,05	0,02	—
23	0,9996	10,3723	1,0000	21,0000	0,04	0,15	—
24	0,9920	10,2615	0,9920	20,8900	0,00	0,14	0,992
25	1,0500	17,3248	1,0500	27,9300	0,00	0,22	1,05
26	1,0150	19,2787	1,0150	29,7100	0,00	0,82	1,015
27	0,9680	4,6968	0,9680	15,3500	0,00	0,06	0,968
28	0,9616	2,9588	0,9620	13,6200	0,04	0,03	—
29	0,9632	1,9515	0,9630	12,6300	0,02	0,03	—
30	0,9879	8,4178	0,9680	18,7900	1,85	1,03	—
31	0,9670	2,0630	0,9670	12,7500	0,00	0,06	0,967
32	0,9636	4,1346	0,9640	14,8000	0,04	0,02	0,963
33	0,9716	-0,2114	0,9720	10,6300	0,04	0,59	—
34	0,9859	0,3696	0,9860	11,3000	0,01	0,90	0,984
35	0,9807	-0,0605	0,9810	10,8700	0,03	0,90	—
36	0,9800	-0,0547	0,9800	10,8700	0,00	0,88	0,98
37	0,9921	0,8236	0,9920	11,7700	0,01	0,95	—
38	0,9682	6,5586	0,9620	16,9100	0,58	1,10	—
39	0,9705	-2,4830	0,9700	8,4100	0,05	0,77	—
40	0,9700	-3,5187	0,9700	7,3500	0,00	0,68	0,97
41	0,9668	-3,9360	0,9670	6,9200	0,02	0,64	—
42	0,9850	-2,2616	0,9850	8,5300	0,00	0,42	0,985
43	0,9784	0,4305	0,9780	11,2800	0,04	0,62	—
44	0,9848	3,0735	0,9850	13,8200	0,02	0,26	—
45	0,9865	4,9619	0,9870	15,6700	0,05	0,13	—
46	1,0050	7,8056	1,0050	18,4900	0,00	0,05	1,005
47	1,0170	10,0512	1,0170	20,7300	0,00	0,03	—
48	1,0206	9,2707	1,0210	19,9300	0,04	0,04	—
49	1,0250	10,2797	1,0250	20,9400	0,00	0,03	1,025
50	1,0011	8,2232	1,0010	18,9000	0,01	0,02	—
51	0,9668	5,5819	0,9670	16,2800	0,02	0,10	—
52	0,9568	4,6227	0,9570	15,3200	0,02	0,09	—
53	0,9460	3,6319	0,9460	14,3500	0,00	0,17	—
54	0,9550	4,5320	0,9550	15,2600	0,00	0,20	0,955
55	0,9520	4,2364	0,9520	14,9700	0,00	0,22	0,952
56	0,9540	4,4263	0,9540	15,1600	0,00	0,22	0,954
57	0,9706	5,6560	0,9710	16,3600	0,04	0,12	—
58	0,9590	4,7948	0,9590	15,5100	0,00	0,16	—
59	0,9850	8,5661	0,9850	19,3700	0,00	0,46	0,985
60	0,9933	12,4378	0,9930	23,1500	0,03	0,15	—

Ind.	TENSÃO - GoSimul (pu)	ÂNGULO -GoSimul (pu)	TENSÃO - CDF (graus)	ÂNGULO -CDF (graus)	ERRO ABS. DA TENSÃO (%)	ERRO ABS. DO ÂNGULO (%)	TENSÃO DE CTRL.
61	0,9950	13,3326	0,9950	24,0400	0,00	0,13	0,995
62	0,9989	12,7307	0,9980	23,4300	0,08	0,10	0,998
63	0,9737	12,1251	0,9690	22,7500	0,44	0,16	—
64	0,9901	13,8186	0,9840	24,5200	0,57	0,11	—
65	1,0204	16,7696	1,0050	27,6500	1,43	0,73	1,005
66	1,0776	16,4643	1,0500	27,4800	2,56	1,19	1,05
67	1,0351	14,0159	1,0200	24,8400	1,40	0,53	—
68	1,0117	16,7014	1,0030	27,5500	0,81	0,62	—
69	1,0350	19,2731	1,0350	30,0000	0,00	0,20	1,035
70	0,9840	11,8553	0,9840	22,5800	0,00	0,19	0,984
71	0,9868	11,4365	0,9870	22,1500	0,02	0,15	—
72	0,9800	10,2987	0,9800	20,9800	0,00	0,04	0,98
73	0,9910	11,2250	0,9910	21,9400	0,00	0,16	0,991
74	0,9580	10,9164	0,9580	21,6400	0,00	0,18	0,958
75	0,9673	12,1815	0,9670	22,9100	0,03	0,20	—
76	0,9430	11,0499	0,9430	21,7700	0,00	0,17	0,943
77	1,0060	16,0017	1,0060	26,7200	0,00	0,17	1,006
78	1,0034	15,6968	1,0030	26,4200	0,04	0,18	—
79	1,0092	15,9939	1,0090	26,7200	0,02	0,19	—
80	1,0400	18,2338	1,0400	28,9600	0,00	0,19	1,04
81	1,0035	17,2574	0,9970	28,1000	0,60	0,59	—
82	0,9887	16,5200	0,9890	27,2400	0,03	0,17	—
83	0,9845	17,7104	0,9850	28,4200	0,05	0,14	—
84	0,9797	20,2443	0,9800	30,9500	0,03	0,12	—
85	0,9850	21,7986	0,9850	32,5100	0,00	0,14	0,985
86	0,9867	20,4291	0,9870	31,1400	0,03	0,14	—
87	1,0150	20,6883	1,0150	31,4000	0,00	0,14	1,015
88	0,9875	24,9303	0,9870	35,6400	0,05	0,14	—
89	1,0050	28,9862	1,0050	39,6900	0,00	0,12	1,005
90	0,9850	22,5845	0,9850	33,2900	0,00	0,12	0,985
91	0,9800	22,6017	0,9800	33,3100	0,00	0,13	0,98
92	0,9916	23,1094	0,9930	33,8000	0,13	0,07	0,99
93	0,9865	20,0912	0,9870	30,7900	0,05	0,10	—
94	0,9904	17,9324	0,9910	28,6400	0,06	0,13	—
95	0,9808	16,9596	0,9810	27,6700	0,02	0,14	—
96	0,9926	16,7914	0,9930	27,5100	0,04	0,17	—
97	1,0113	17,1621	1,0110	27,8800	0,03	0,17	—
98	1,0235	16,6834	1,0240	27,4000	0,05	0,16	—
99	1,0100	16,3226	1,0100	27,0400	0,00	0,16	1,01
100	1,0170	17,3195	1,0170	28,0300	0,00	0,14	1,017
101	0,9922	18,8976	0,9930	29,6100	0,07	0,15	—
102	0,9905	21,6021	0,9910	32,3000	0,05	0,10	—
103	1,0007	13,7246	1,0010	24,4400	0,03	0,16	1,01
104	0,9710	10,9796	0,9710	21,6900	0,00	0,14	0,971
105	0,9660	9,8575	0,9650	20,5700	0,09	0,15	0,965
106	0,9618	9,6097	0,9620	20,3200	0,02	0,14	—
107	0,9520	6,8195	0,9520	17,5300	0,00	0,14	0,952
108	0,9668	8,6666	0,9670	19,3800	0,02	0,15	—
109	0,9675	8,2173	0,9670	18,9300	0,05	0,15	—
110	0,9730	7,3785	0,9730	18,0900	0,00	0,14	0,973
111	0,9800	9,0236	0,9800	19,7400	0,00	0,16	0,98
112	0,9750	4,2793	0,9750	14,9900	0,00	0,14	0,975
113	0,9930	3,0047	0,9930	13,7400	0,00	0,23	0,993
114	0,9604	3,8083	0,9600	14,4600	0,04	0,06	—
115	0,9603	3,8014	0,9600	14,4600	0,03	0,04	—
116	1,0050	16,3102	1,0050	27,1200	0,00	0,48	1,005
117	0,9738	0,0208	0,9740	10,6700	0,02	0,07	—
118	0,9494	11,1930	0,9490	21,9200	0,04	0,20	—

Fonte: autoria própria.

Tabela 18: GoSimul - Resultados de Geração para IEEE 118 Barra

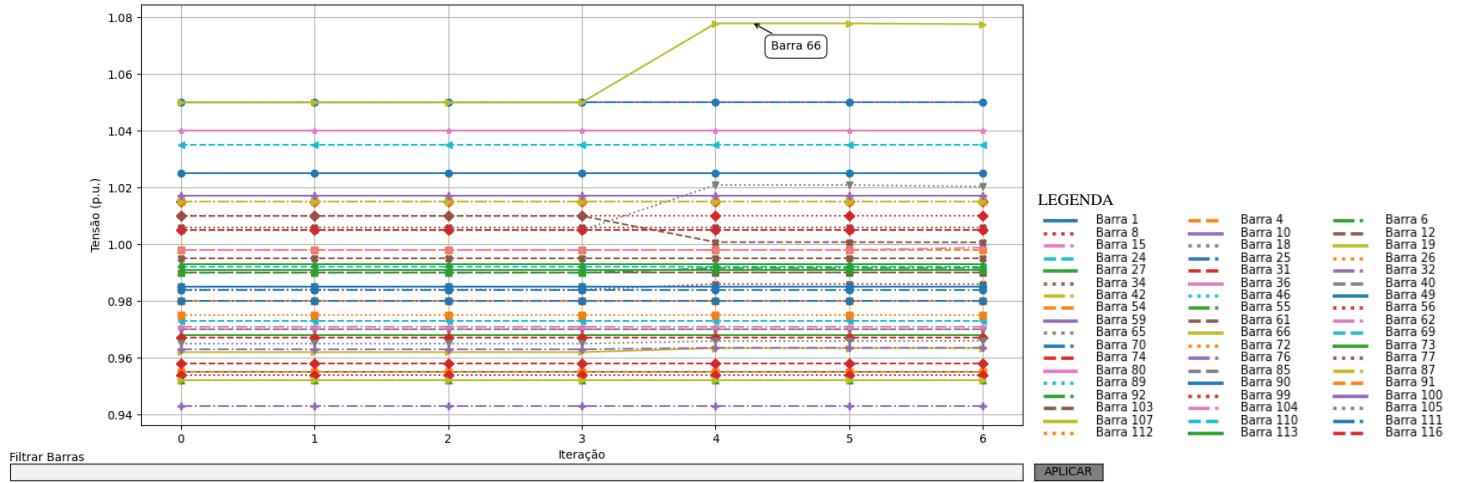
Ind.	POT. ATIVA (P) GERADA/CONS. (pu)	POT. REATIVA (Q) GERADA/CONS. (pu)	LIMITE Qmin (pu)	LIMITE Qmáx (pu)	TIPO DE BARRA (INICIAL)	TIPO DE BARRA (FINAL)
1	-0,0140	-0,0140	-0,05	0,15	Swing	Swing
2	-0,2000	-0,0900	-	-	PQ	PQ
3	-0,3900	-0,1000	-	-	PQ	PQ
4	-0,0900	-0,1284	-3	3	PV	PV
5	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
6	0,0000	0,1627	-0,13	0,5	PV	PV
7	-0,1900	-0,0200	-	-	PQ	PQ
8	-0,2800	0,5621	-3	3	PV	PV
9	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
10	4,5000	-0,5104	-1,47	2	PV	PV
11	-0,7000	-0,2300	-	-	PQ	PQ
12	0,8500	0,9159	-0,35	1,2	PV	PV
13	-0,3400	-0,1600	-	-	PQ	PQ
14	-0,1400	-0,0100	-	-	PQ	PQ
15	0,0000	0,0338	-0,1	0,3	PV	PV
16	-0,2500	-0,1000	-	-	PQ	PQ
17	-0,1100	-0,0300	-	-	PQ	PQ
18	0,0000	0,2582	-0,16	0,5	PV	PV
19	0,0000	-0,0800	-0,08	0,24	PV	PQ
20	-0,1800	-0,0300	-	-	PQ	PQ
21	-0,1400	-0,0800	-	-	PQ	PQ
22	-0,1000	-0,0500	-	-	PQ	PQ
23	-0,0700	-0,0300	-	-	PQ	PQ
24	-0,1300	-0,1526	-3	3	PV	PV
25	2,2000	0,5159	-0,47	1,4	PV	PV
26	3,1400	0,0558	-10	10	PV	PV
27	-0,0900	0,0301	-3	3	PV	PV
28	-0,1700	-0,0700	-	-	PQ	PQ
29	-0,2400	-0,0400	-	-	PQ	PQ
30	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
31	0,0700	0,3209	-3	3	PV	PV
32	0,0000	-0,1400	-0,14	0,42	PV	PQ
33	-0,2300	-0,0900	-	-	PQ	PQ
34	0,0000	-0,0800	-0,08	0,24	PV	PQ
35	-0,3300	-0,0900	-	-	PQ	PQ
36	0,0000	-0,0172	-0,08	0,24	PV	PV
37	-0,0001	0,0000	-	-	PQ	PQ
38	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
39	-0,2700	-0,1100	-	-	PQ	PQ
40	-0,4600	0,2658	-3	3	PV	PV
41	-0,3700	-0,1000	-	-	PQ	PQ
42	-0,5900	0,4761	-3	3	PV	PV
43	-0,1800	-0,0700	-	-	PQ	PQ
44	-0,1600	-0,0800	-	-	PQ	PQ
45	-0,5300	-0,2200	-	-	PQ	PQ
46	0,1900	-0,0502	-1	1	PV	PV
47	-0,3400	0,0000	-	-	PQ	PQ
48	-0,2000	-0,1100	-	-	PQ	PQ
49	2,0401	0,6808	-0,85	2,1	PV	PV
50	-0,1700	-0,0400	-	-	PQ	PQ
51	-0,1700	-0,0800	-	-	PQ	PQ
52	-0,1800	-0,0500	-	-	PQ	PQ
53	-0,2300	-0,1100	-	-	PQ	PQ
54	0,4800	0,0887	-3	3	PV	PV
55	0,0000	0,0467	-0,08	0,23	PV	PV
56	0,0000	0,0149	-0,08	0,15	PV	PV
57	-0,1200	-0,0300	-	-	PQ	PQ
58	-0,1200	-0,0300	-	-	PQ	PQ

Ind.	POT. ATIVA (P) GERADA/CONS. (pu)	POT. REATIVA (Q) GERADA/CONS. (pu)	LIMITE Qmin (pu)	LIMITE Qmáx (pu)	TIPO DE BARRA (INICIAL)	TIPO DE BARRA (FINAL)
59	1,5500	0,7451	-0,6	1,8	PV	PV
60	-0,7800	-0,0300	-	-	PQ	PQ
61	1,5999	-0,6670	-1	3	PV	PV
62	0,0001	-0,2000	-0,2	0,2	PV	PQ
63	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
64	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
65	3,9100	-0,6700	-0,67	2	PV	PQ
66	3,9199	-0,6700	-0,67	2	PV	PQ
67	-0,2799	-0,0700	-	-	PQ	PQ
68	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
69	5,1640	-2,7508	-3	3	PV	PV
70	0,0000	0,0986	-0,1	0,32	PV	PV
71	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
72	-0,1200	-0,1112	-1	1	PV	PV
73	-0,0600	0,0966	-1	1	PV	PV
74	0,0000	-0,0560	-0,06	0,09	PV	PV
75	-0,4700	-0,1100	-	-	PQ	PQ
76	0,0000	0,0528	-0,08	0,23	PV	PV
77	0,0000	0,1427	-0,2	0,7	PV	PV
78	-0,7100	-0,2600	-	-	PQ	PQ
79	-0,3900	-0,3200	-	-	PQ	PQ
80	4,7700	1,0038	-1,65	2,8	PV	PV
81	0,0000	0,0000	-	-	PQ	PQ
82	-0,5400	-0,2700	-	-	PQ	PQ
83	-0,2000	-0,1000	-	-	PQ	PQ
84	-0,1100	-0,0700	-	-	PQ	PQ
85	0,0000	-0,0572	-0,08	0,23	PV	PV
86	-0,2100	-0,1000	-	-	PQ	PQ
87	0,0400	0,1102	-1	10	PV	PV
88	-0,4800	-0,1000	-	-	PQ	PQ
89	6,0700	0,0043	-2,1	3	PV	PV
90	-0,8500	0,6511	-3	3	PV	PV
91	-0,1000	-0,1436	-1	1	PV	PV
92	0,0000	-0,0300	-0,03	0,09	PV	PQ
93	-0,1200	-0,0700	-	-	PQ	PQ
94	-0,3000	-0,1600	-	-	PQ	PQ
95	-0,4200	-0,3100	-	-	PQ	PQ
96	-0,3800	-0,1500	-	-	PQ	PQ
97	-0,1500	-0,0900	-	-	PQ	PQ
98	-0,3400	-0,0800	-	-	PQ	PQ
99	-0,4200	-0,1754	-1	1	PV	PV
100	2,5200	1,1090	-0,5	1,55	PV	PV
101	-0,2200	-0,1500	-	-	PQ	PQ
102	-0,0500	-0,0300	-	-	PQ	PQ
103	0,4000	0,4000	-0,15	0,4	PV	PQ
104	0,0000	0,0565	-0,08	0,23	PV	PV
105	0,0000	-0,0800	-0,08	0,23	PV	PQ
106	-0,4300	-0,1600	-	-	PQ	PQ
107	-0,2200	0,0570	-2	2	PV	PV
108	-0,0200	-0,0100	-	-	PQ	PQ
109	-0,0800	-0,0300	-	-	PQ	PQ
110	0,0000	0,0486	-0,08	0,23	PV	PV
111	0,3600	-0,0184	-1	10	PV	PV
112	-0,4300	0,4151	-1	10	PV	PV
113	-0,0600	0,0683	-1	2	PV	PV
114	-0,0800	-0,0300	-	-	PQ	PQ
115	-0,2200	-0,0700	-	-	PQ	PQ
116	-1,8400	-1,5825	-10	10	PV	PV
117	-0,2000	-0,0800	-	-	PQ	PQ

Ind.	POT. ATIVA (P) GERADA/CONS. (pu)	POT. REATIVA (Q) GERADA/CONS. (pu)	LIMITE Qmin (pu)	LIMITE Qmáx (pu)	TIPO DE BARRA (INICIAL)	TIPO DE BARRA (FINAL)
118	-0,3300	-0,1500	-	-	PQ	PQ

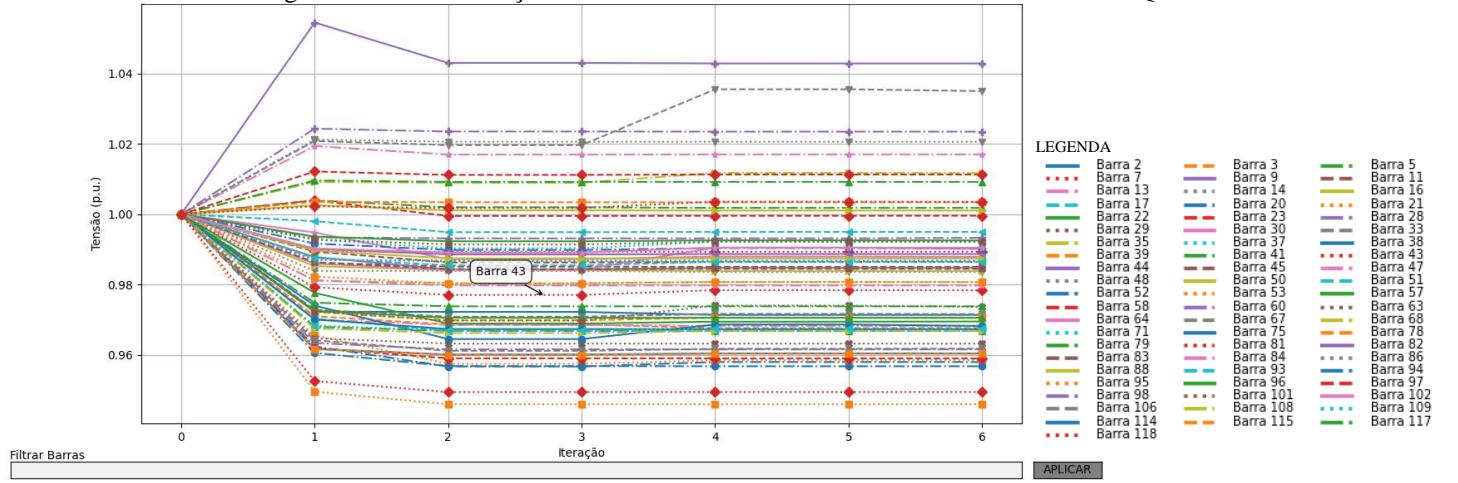
Fonte: autoria própria.

Figura 38: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 118 - Barras PV



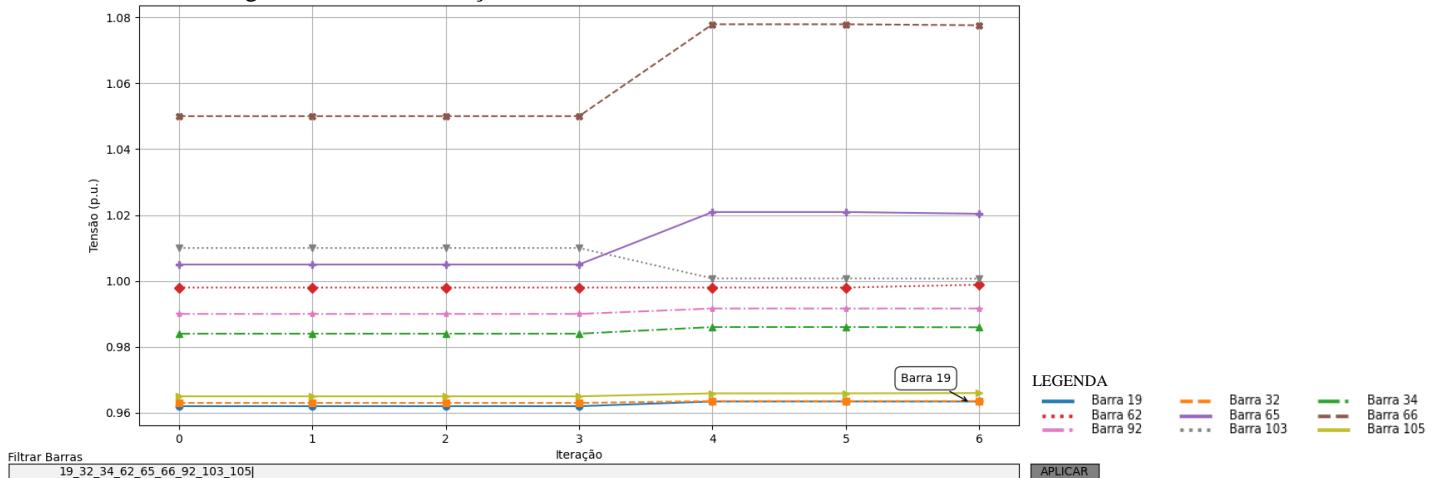
Fonte: autoria própria.

Figura 39: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 118 - Barras PQ



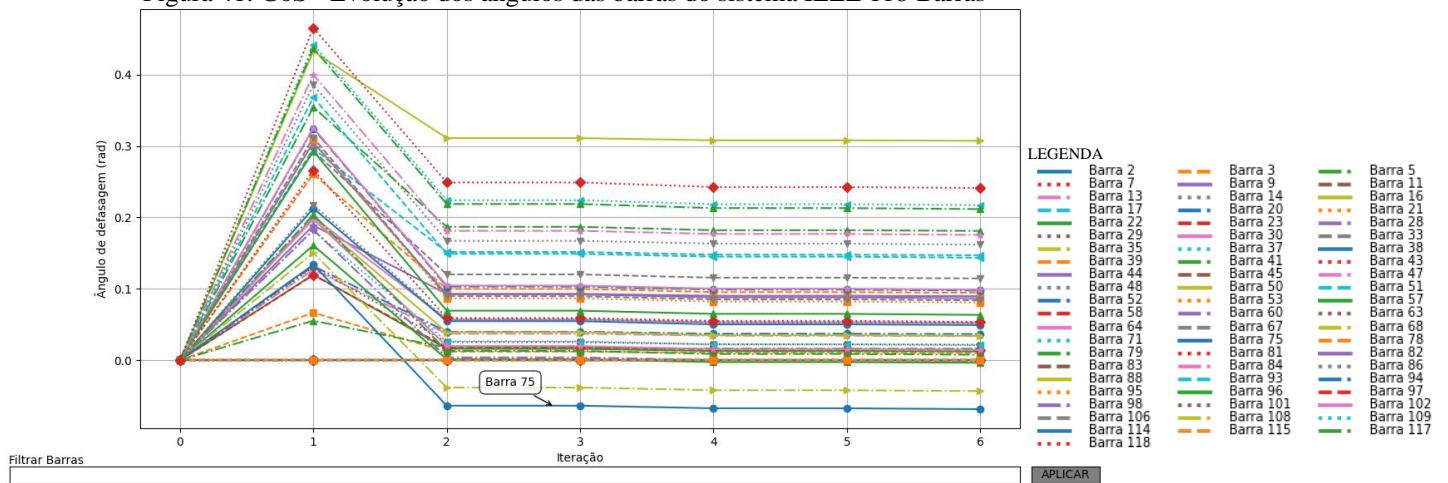
Fonte: autoria própria.

Figura 40: GoS - Evolução das tensões das barras do sistema IEEE 118 - Barras Violadas



Fonte: autoria própria

Figura 41: GoS - Evolução dos ângulos das barras do sistema IEEE 118 Barras



Fonte: autoria própria.

5. *GoCases* – GENERATOR OF CASES

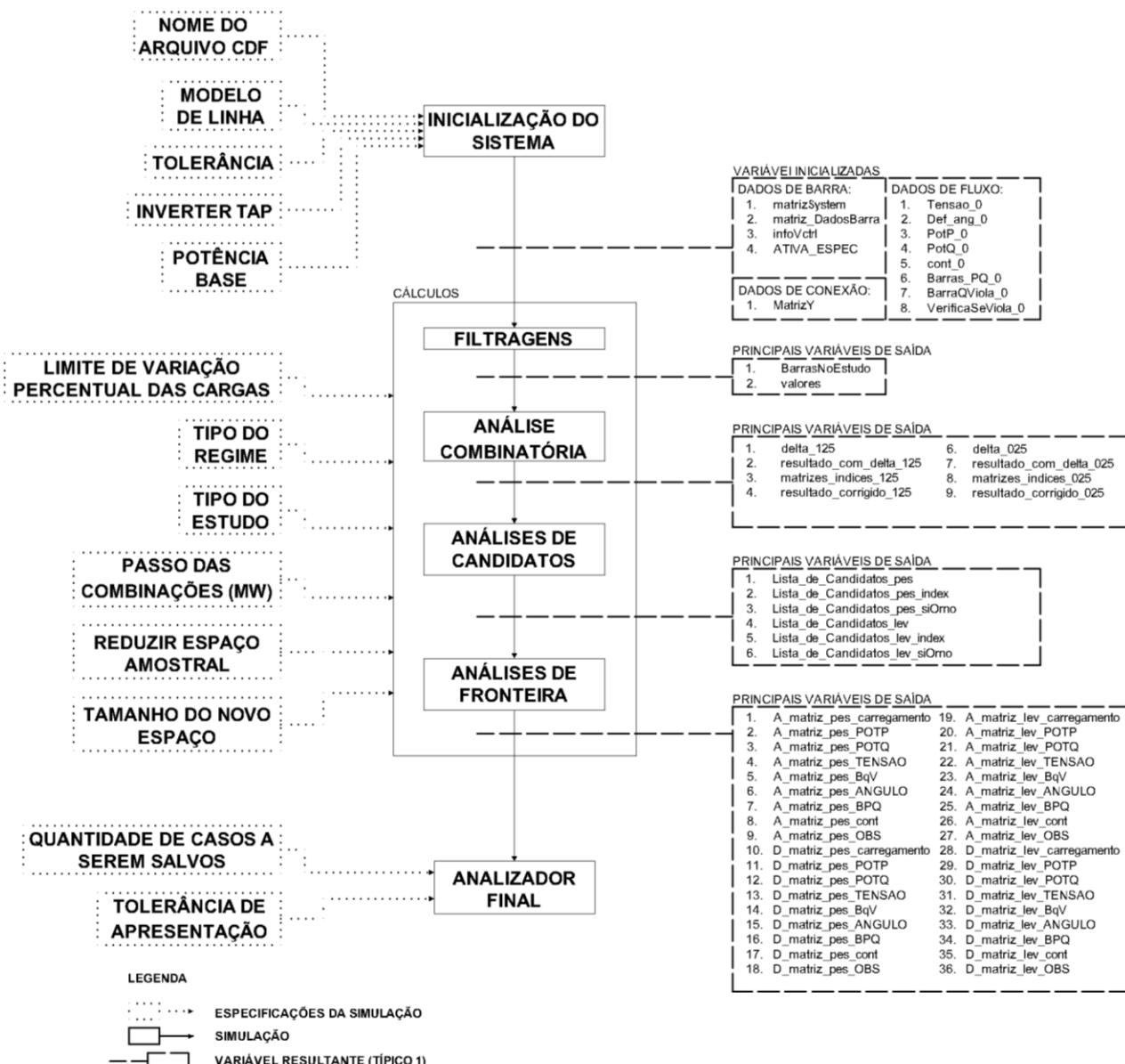
5.1 Considerações Iniciais

Com a finalidade de estudar o comportamento dos controles de tensão por injeção de reativo frente a diferentes mudanças no perfil de potência ativa do sistema, foi desenvolvido também em linguagem Python uma aplicação que determina o fluxo de potência para diferentes combinações de mudanças nas potências ativas das cargas e está representado abaixo pelo fluxograma da Figura 42.

As primeiras variáveis inicializadas correspondem ao fluxo de potência 0, extraído do arquivo CDF. Os dados do fluxo convergido e do sistema são utilizados como referência para todos os cálculos subsequentes. Também devem ser definidas as principais características do estudo a ser realizado, tais como:

- Limite de variação percentual das cargas;
- Tipo de regime;
- Passo das combinações;
- Tipo de estudo;
- Decisão de reduzir (ou não) o espaço amostral de barras e, se sim;
- Quais barras compõem o novo espaço amostral.

Figura 42: Fluxograma Geral GoCases - Generator of Cases



Fonte: autoria própria.

O primeiro parâmetro listado, Limite de variação percentual das cargas, define a variação máxima permitida nas cargas selecionadas durante o processo de busca pelas fronteiras de operação. Já o Tipo de regime indica se o estudo será realizado com aumento ou redução de carga, enquanto o Passo das combinações especifica o incremento (em potência) utilizado para refinar o processo iterativo e identificar os pontos de fronteira.

Os três últimos parâmetros — tipo de estudo, a decisão de reduzir ou não o espaço amostral e o tamanho do novo espaço de estudo — atuam em conjunto para restringir o número de combinações possíveis e orientar a busca para pontos específicos do sistema, ou seja, para quais barras devem ser feitos os estudos. Essa abordagem é especialmente útil para sistemas de maior porte, como os modelos IEEE 30 e IEEE 118 barras, nos quais a quantidade de combinações possíveis entre barras de carga pode ser computacionalmente inviável. Por exemplo, considerando todas as barras do sistema IEEE 118 como candidatas à variação de carga, o número total de combinações possíveis seria da ordem de 2^{118} o que representa aproximadamente $3,2 \times 10^{35}$ possibilidades — um volume impossível de ser processado com os recursos computacionais disponíveis atualmente. Assim, a redução do espaço amostral torna-se essencial para viabilizar os estudos.

A Tabela 20 apresenta a lista completa de parâmetros de entrada e os valores típicos utilizados para os sistemas em estudo. Finalmente, o Analisador Final é o módulo responsável por consolidar os resultados, aplicando filtros para destacar os casos de interesse, conforme será detalhado nas seções seguintes.

5.2 Cálculos

Após a seleção das características do estudo, os filtros atuam em conjunto para definir, ao menos, três parâmetros relevantes:

- *BarrasNoEstudo*: contém apenas as barras que farão parte das variações de carga;
- *valores*: vetor com as potências ativas do fluxo de potência 0 para as barras incluídas no estudo;
- *delta*: pode assumir *delta_025* ou *delta_125*, indicando os valores das cargas alterados de acordo com o limite de variação percentual escolhido. O sufixo “025”

é reservado para o *tipo de regime leve*, enquanto “125” se aplica ao *tipo de regime pesado*.

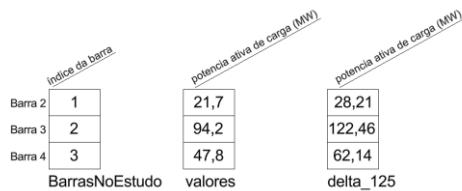
A Tabela 19 a seguir apresenta um exemplo de aplicação real e os valores dos parâmetros internos relevantes definidos. *BarrasNoEstudo*, *valores* e *delta* são os principais parâmetros internos que são criados para representar o estudo após a filtragem (Figura 43). Enquanto *BarrasNoEstudo* mantém a informação do índice das barras que devem estar no estudo, *valores* traz suas respectivas potências. É importante salientar que a nem a barra swing (barra 1) e nenhuma barras de passagem são consideradas, logo, no exemplo de aplicação, deve-se desconsiderar a primeira barra. *delta* é o vetor responsável por trazer as potências com a aplicação da variação percentual de acordo com o tipo do regime escolhido.

Tabela 19: GoCases - Configuração exemplar para IEEE 14 Barras

<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	ieee14.cdf
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001
<i>INVERTER TAP</i>	Sim
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	Não
<i>POTÊNCIA BASE (MW)</i>	100
<i>LIMITE DE VARIAÇÃO PERCENTUAL DAS CARGAS</i>	30
<i>TIPO DO REGIME</i>	pesado
<i>TIPO DO ESTUDO</i>	Todo Espaço Amostral
<i>PASSO DAS COMBINAÇÕES (MW)</i>	1
<i>REDUZIR ESPAÇO AMOSTRAL</i>	yes
<i>TAMANHO DO NOVO ESPAÇO</i>	1-4
<i>QUANTIDADE DE CASOS A SEREM SALVOS</i>	1000
<i>TOLERÂNCIA DE APRESENTAÇÃO</i>	3

Fonte: autoria própria.

Figura 43: GoCases - Listas de principais parâmetros internos - exemplo IEEE 14 Barras



The diagram illustrates three tables representing internal parameters for the IEEE 14 Bus case:

- BarrasNoEstudo:** A vertical column of indices for four buses (Barra 2, Barra 3, Barra 4) with values 1, 2, and 3 respectively. The header "Índice da barra" is shown above the first row.
- valores:** A horizontal row of three columns representing active power values in MW. The first column is labeled "potência ativa de carga (MW)" and contains values 21,7, 94,2, and 47,8. The second column is labeled "potência ativa de carga (MW)" and contains values 28,21, 122,46, and 62,14. The third column is labeled "potência ativa de carga (MW)" and contains values 28,21, 122,46, and 62,14.
- delta_125:** A horizontal row of three columns representing active power values with a 125% variation applied. The first column is labeled "potência ativa de carga (MW)" and contains values 28,21, 122,46, and 62,14. The second column is labeled "potência ativa de carga (MW)" and contains values 28,21, 122,46, and 62,14. The third column is labeled "potência ativa de carga (MW)" and contains values 28,21, 122,46, and 62,14.

Fonte: autoria própria.

O segundo sub-bloco de funções de cálculo do GoCases realiza a análise combinatória das barras selecionadas para o estudo. Nesse momento, é criada a variável *matriz_indices*, que armazena todas as combinações possíveis, atribuindo índices correspondentes às barras com potência alterada e zero às barras sem alteração. Esse sub-bloco também é responsável por gerar a lista *resultado_com_delta*, contendo os valores das potências alteradas e não alteradas para cada combinação definida, conforme ilustrado no exemplo da Tabela X. Em seguida, as listas contendo os índices das barras

e os resultados das substituições de potência são encaminhadas para a avaliação de candidatos. Cada conjunto de potência de *resultado_com_delta* é aplicado nas matrizes do sistema e o fluxo de potência é calculado. Caso haja alguma alteração nos vetores de controle *BarraQViola* ou *VerificaSeViola* em comparação com o fluxo de potência 0, uma função interna retorna o valor booleano “sim”. Neste ponto, é criada a lista *Lista_de_Candidatos_siOrno* para armazenar esse resultado.

Figura 44: GoCases - Principais listas após Análise Combinatória - exemplo IEEE 14

	Barra 2	Barra 3	Barra 4				
1	0	0		28,21	94,2	47,8	no
0	2	0		21,7	122,46	47,8	yes
0	0	3		21,7	94,2	62,14	no
1	2	0		28,21	122,46	47,8	yes
1	0	3		28,21	94,2	62,14	yes
0	2	3		21,7	122,46	62,14	yes
1	2	3		28,21	122,46	62,14	yes

matrizes_indices resultado_com_delta Lista_de_Candidatos_siOrno

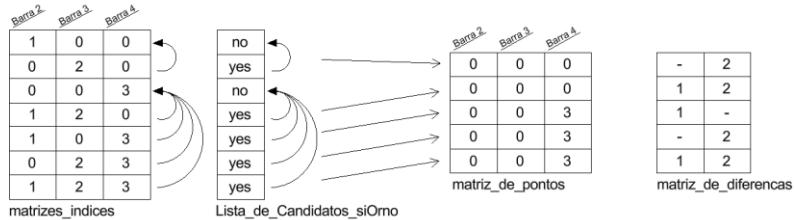
Fonte: autoria própria.

As análises de fronteira têm como objetivo determinar, com maior precisão, os valores das potências ativas das cargas que alteram o status nas listas de controle (*BarraQViola* ou *VerificaSeViola*), ou seja, avaliar melhor os pontos “yes” da *Lista_de_Candidatos_siOrno*. Para isso, realizam-se novos fluxos de potência, iniciando-se em uma referência de potências ativas sem alterações de status (ponto “no”) nas variáveis de controle e avançando até um ponto em que ao menos uma mudança tenha sido detectada (ponto “yes”). A precisão da fronteira depende diretamente do passo das combinações adotado e do número de graus de liberdade na seleção das barras que recebem ajustes deste passo.

A estratégia para seleção dos pontos de fronteira consiste em percorrer a *Lista_de_Candidatos_siOrno* e, para cada ocorrência de “yes”, comparar a linha correspondente em *matriz_indices* com a linha da mesma matriz em que o último resultado foi “no” - Figura 45. Neste processo é criada a lista *matriz_dePontos* e *matriz_de_diferencias* que salvam os resultados desta comparação. *matriz_dePontos* é a lista que salva as intersecções dos valores dos índices entre as duas linhas comparadas e trazem a informação se a barra marcada deve ficar com a potência ativa de carga alterada pelo valor percentual, enquanto *matriz_de_diferencias* salva os índices exclusivos à linha marcada como “sim” e indicam as barras que devem

receber o ajuste pelo passo. Este processo garante um menor número de iterações já que não se aplica o passo em todas as barras detectadas para mudança.

Figura 45: GoCases - Seleção dos pontos de fronteira – exemplo IEEE 14



Fonte: autoria própria.

O valor 0 na *matriz_dePontos* significa que a potência da barra não se altera, enquanto se contiver o índice da barra significa que esta potência deve ser alterada imediatamente para o valor corrigido pelo limite de variação percentual. Já o valor que se encontra na lista *matriz_de_diferencias* indica o índice das barras que devem ser alteradas pelo passo das combinações (+ST). Analisando os pontos de fronteira determinados na Figura 46, observa-se que há dois pontos com um único grau de liberdade, isto é, permite a variação de apenas uma carga simultaneamente, enquanto há três pontos com dois graus de liberdade – permite a variação de duas cargas simultaneamente. Após este acréscimo/decréscimo residual das potências ativas determinadas pela *matriz_de_diferencias*, realiza-se novamente o fluxo de potência até que alguma alteração nas variáveis de controle confirme a detecção de uma fronteira. São salvos os dados do fluxo de potência nos dois momentos críticos: antes (*A_matriz*) e depois (*D_matriz*) da detecção da fronteira. Para cada ponto de fronteira detectado são armazenados os seguintes dados:

- *Carregamento*: potências ativas das cargas no ponto de fronteira;
- *TENSAO*: tensões de barra;
- *ANGULO*: ângulos de defasagem;
- *PotP* e *PotQ*: potências líquidas ativa e reativa;
- *BqV*: identificação das barras que violam limites de Q;

Esses dados são encaminhados ao Analisador Final, que se encarrega de apresentar os resultados obtidos de maneira filtrada, destacando apenas os casos de interesse para o estudo em questão.

Figura 46: GoCases - Determinação dos pontos de fronteira - exemplo IEEE 14

	Barra_2	Barra_3	Barra_4	0	+ST	47,8	7,6	11,2	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	+ST	+ST	47,8	7,6	11,2	0	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9	
0	+ST	94,2	62,14	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9		
0	21,7	+ST	62,14	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9		
0	+ST	+ST	62,14	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9		

Lista_de_Candidatos

Fonte: autoria própria.

Figura 47: GoCases - Pontos de fronteiras detectados - exemplo IEEE 14

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
0	21,7	117,2	47,8	7,6	11,2	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9	
0	28,21	108,2	47,8	7,6	11,2	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9	
0	25,7	94,2	62,14	7,6	11,2	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9	
0	21,7	100,2	62,14	7,6	11,2	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9	
0	23,7	96,2	62,14	7,6	11,2	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9	

A_matrix_caregamento

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
1,06	1,045	1,01	1,017	1,019	1,07	1,061	1,09	1,055	1,051	1,057	1,055	1,050	1,035	
1,06	1,045	1,01	1,017	1,019	1,07	1,061	1,09	1,055	1,051	1,057	1,055	1,050	1,035	
1,06	1,045	1,01	1,015	1,018	1,07	1,060	1,09	1,055	1,050	1,056	1,055	1,050	1,035	
1,06	1,045	1,01	1,015	1,018	1,07	1,060	1,09	1,055	1,050	1,056	1,055	1,050	1,035	
1,06	1,045	1,01	1,015	1,018	1,07	1,060	1,09	1,055	1,050	1,056	1,055	1,050	1,035	

A_matrix_TENSAO

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
0	-0,098	-0,260	-0,197	-0,167	-0,263	-0,250	-0,250	-0,277	-0,280	-0,274	-0,278	-0,280	-0,296	
0	-0,097	-0,248	-0,193	-0,164	-0,260	-0,246	-0,246	-0,273	-0,276	-0,270	-0,275	-0,276	-0,292	
0	-0,095	-0,235	-0,196	-0,166	-0,262	-0,249	-0,249	-0,276	-0,278	-0,273	-0,277	-0,278	-0,294	
0	-0,094	-0,243	-0,199	-0,168	-0,265	-0,251	-0,251	-0,279	-0,281	-0,275	-0,279	-0,281	-0,297	
0	-0,095	-0,237	-0,196	-0,166	-0,263	-0,249	-0,249	-0,276	-0,279	-0,273	-0,278	-0,279	-0,295	

A_matrix_ANGULO

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
2,588	0,183	-1,172	-0,478	-0,076	-0,112	0,0	0,0	-0,295	-0,090	-0,035	-0,061	-0,135	-0,149	
2,553	0,118	-1,082	-0,478	-0,076	-0,112	0,0	0,0	-0,295	-0,090	-0,035	-0,061	-0,135	-0,149	
2,526	0,143	-0,942	-0,621	-0,076	-0,112	0,0	0,0	-0,295	-0,090	-0,035	-0,061	-0,135	-0,149	
2,553	0,183	-1,002	-0,621	-0,076	-0,112	0,0	0,0	-0,295	-0,090	-0,035	-0,061	-0,135	-0,149	
2,528	0,163	-0,962	-0,621	-0,076	-0,112	0,0	0,0	-0,295	-0,090	-0,035	-0,061	-0,135	-0,149	

A_matrix_POTP

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
-0,213	0,372	0,161	0,039	-0,016	0,055	0,0	0,178	-0,166	-0,058	-0,018	-0,016	-0,058	-0,050	
-0,208	0,372	0,121	0,039	-0,016	0,054	0,0	0,177	-0,166	-0,058	-0,018	-0,016	-0,058	-0,050	
-0,195	0,372	0,074	0,039	-0,016	0,064	0,0	0,184	-0,166	-0,058	-0,018	-0,016	-0,058	-0,050	
-0,198	0,373	0,100	0,039	-0,016	0,064	0,0	0,184	-0,166	-0,058	-0,018	-0,016	-0,058	-0,050	
-0,194	0,370	0,083	0,039	-0,016	0,064	0,0	0,184	-0,166	-0,058	-0,018	-0,016	-0,058	-0,050	

A_matrix_POTQ

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A_matrix_BqV

Fonte: autoria própria.

	Barra_2	Barra_3	Barra_4	0	+ST	47,8	7,6	11,2	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	+ST	+ST	47,8	7,6	11,2	0	0	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	+ST	94,2	62,14	7,6	11,2	0	0	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	21,7	+ST	62,14	7,6	11,2	0	0	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	+ST	+ST	62,14	7,6	11,2	0	0	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9

Fonte: autoria própria.

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
0	21,7	118,2	47,8	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	28,21	109,2	47,8	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	26,7	94,2	62,14	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	21,7	101,2	62,14	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9
0	24,7	97,2	62,14	7,6	11,2	0	0	0	29,5	9,0	3,5	6,1	13,5	14,9

D_matrix_caregamento

	Barra_1	Barra_2	Barra_3	Barra_4	Barra_5	Barra_6	Barra_7	Barra_8	Barra_9	Barra_10	Barra_11	Barra_12	Barra_13	Barra_14
1,06	1,044	1,01	1,017	1,019	1,07	1,061	1,09	1,055	1,051	1,057	1,055	1,050	1,035	
1,06	1,044	1,01	1,017	1,019	1,07	1,061	1,09	1,056	1,051	1,057</				

5.3 Analisador Final

5.3.1 Considerações Iniciais

Todos os dados de entrada e possíveis combinações dos estudos estão sintetizados na Tabela 20.

Tabela 20: GoCases - Resumo das características dos estudos que podem ser realizados

ENTRADA	TIPO DA ENTRADA	COMENTÁRIOS
<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	1. <i>ieee9_Marcelo.cdf</i> 2. <i>ieee14.cdf</i> 3. <i>ieee30.cdf</i> 4. <i>ieee118.cdf</i>	<ul style="list-style-type: none"> O sistema IEEE 9 barras possui como referência o trabalho de X.
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001	
<i>INVERTER TAP</i>	1. <i>Não</i> 2. <i>Sim</i>	
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	1. <i>Não</i> 2. <i>Sim</i>	
<i>POTÊNCIA BASE (MW)</i>	100	
<i>LIMITE DE VARIAÇÃO PERCENTUAL DAS CARGAS</i>	—	
<i>TIPO DO REGIME</i>	1. <i>leve</i> 2. <i>pesado</i> 3. <i>ambos</i>	<ul style="list-style-type: none"> O regime “<i>leve</i>” leva a uma diminuição gradual das cargas; O regime “<i>pesado</i>” leva a um aumento; O regime “<i>ambos</i>” averigua os dois regimes anteriores.
<i>TIPO DO ESTUDO</i>	1. <i>Todo Espaco Amostral</i> 2. <i>Segregar (PV)</i> 3. <i>Segregar (PQ)</i> 4. <i>Segregar (PQ)_(PV)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Filtro de seleção de barra para aplicação do estudo. <i>Todo Espaco Amostral</i> inclui todas as barras selecionadas; <i>Segregar (PV)</i> incluem apenas as barras PV no trecho selecionado. <i>Segregar (PQ)</i> incluem apenas as barras PQ no trecho selecionado. <i>Segregar (PQ)_(PV)</i> incluem as barras PQ no trecho selecionado e podem incluir também todas as PV.
<i>PASSO DAS COMBINAÇÕES (MW)</i>	—	<ul style="list-style-type: none"> O passo das combinações refere-se ao passo que será acrescido as cargas para a determinação das fronteiras. Representado por “+ST” na Figura 46.
<i>REDUZIR ESPAÇO AMOSTRAL</i>	3. <i>Não</i> 4. <i>Sim</i>	<ul style="list-style-type: none"> Indicado para os estudos com IEEE 30 Barras e IEEE 118 Barras.
<i>TAMANHO DO NOVO ESPAÇO</i>	5. <i>“1-5”</i> 1. <i>“1-2_5-8”</i>	<ul style="list-style-type: none"> “<i>1-5</i>” significa que o estudo é composto das barras de 1 a 5. “<i>1-2_5-8</i>” significa que o estudo é composto das barras de 1 a 2 e de 5 a 8.
<i>QUANTIDADE DE CASOS A SEREM SALVOS</i>	—	<ul style="list-style-type: none"> Quantidade de pontos que devem ser salvos no diretório.
<i>TOLERÂNCIA DE APRESENTAÇÃO</i>	—	<ul style="list-style-type: none"> Tolerância (em números significativos) para averiguação situacional das outras barras com violação de limites (apenas para IEEE 30 e 118 barras). Tolerância de apresentação dos resultados.

Fonte: autoria própria.

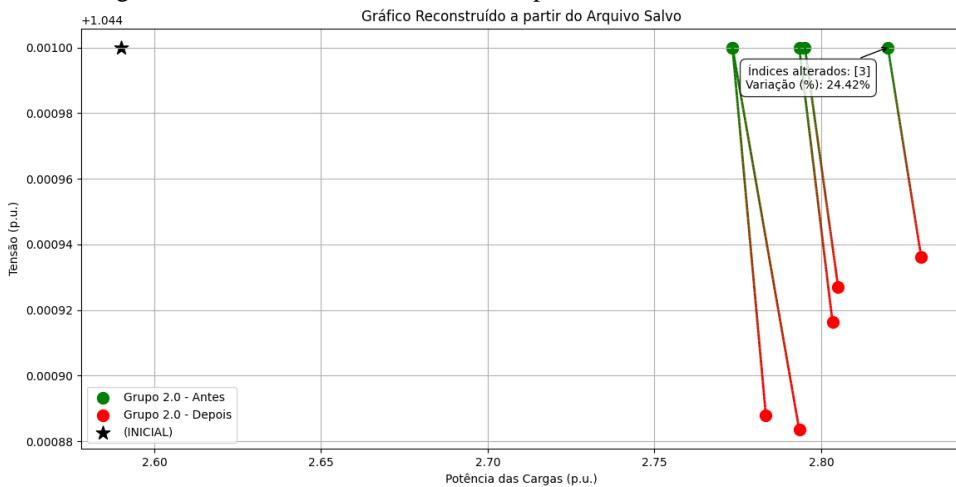
Para apresentação dos resultados do GoCases, duas estratégias foram utilizadas na análise final:

- Inserir os pontos detectados em um gráfico de pontos da curva PV.

- Utilizar tabelas de informações.

Devido a quantidade de pontos que podem ser gerados, uma maneira gráfica de representar os estudos foi criada com base em pontos da curva PV. Para tal, cada ponto foi representado pela soma das potências ativas das cargas e pela Tensão antes e depois da violação de limites. Para o exemplo da Tabela 19 o resultado gráfico está presente na Figura 48 abaixo. No gráfico as únicas tensões plotadas são referentes as barras ou grupo de geração que tem seus limites de geração de potência reativa atingidos.

Figura 48: GoCases - Resultado do exemplo com IEEE 14 – Análise Gráfica



Fonte: autoria própria.

Os gráficos são programados no Python usando as bibliotecas X e Z são iterativos e mostram um *pop-up* com a variação percentual (adicionada se for positivo ou reduzida se for negativo) e as barras cujas cargas foram alteradas. Na legenda, além da **estrela** que significa valor da tensão inicial detectada, **grupo** corresponde ao grupo de unidades geradoras que tem limites de reativos violados. A ideia do gráfico é indicar de forma visual o comportamento da fronteira. Como pode ser observado, a barra 2, no exemplo é a barra que possui violação dos limites superiores, pois a tensão, outrora controlada em 1,045pu como indicado pela estrela na Figura 48, isto é, V_{2ctrl} , depois dos aumentos de potência indicados Figura 47 e também mostrados pelo, deixa de ser controlada de tal modo que $V_{2depois} < V_{2ctrl}$.

O gráfico é a única forma de representar simultaneamente todos os pontos obtidos nos diferentes estudos. A apresentação desses dados em formato tabular exigiria um número excessivo de páginas, o que inviabiliza sua inclusão completa neste trabalho.

Por esse motivo, as tabelas serão utilizadas apenas para destacar alguns pontos específicos de interesse como evidenciar quais barras possuem o limite de violação detectado nas proximidades do ponto inicial. No entanto, por meio da interface em **HTML** desenvolvida (descrita na Seção X), é possível acessar todas as informações tabulares de forma completa e interativa, permitindo a consulta detalhada dos dados gerados.

Tabela 21: GoCases - Resultado do exemplo com IEEE 14 – Análise Tabular: regime pesado

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor Porc. (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status por barras
PV	24,00	3	25	2	PIOR	1 de 5	-
PV	22,51	2_3	30_17	2	PIOR	1 de 5	-
PQPV	20,34	2_4	28_30	2	PIOR	1 de 5	-
PQPV	22,34	3_4	8_30	2	PIOR	1 de 5	-
PQPV	22,34	2_3_4	18_4_30	2	PIOR	1 de 5	-

Fonte: autoria própria.

As informações registradas incluem a coluna **Tag**, que indica o tipo de barra cuja potência foi alterada (se foi apenas alteração nas barras PV, ou apenas em barras PQ ou se nas duas); **Pot. P Adic.**, que quantifica a potência ativa total adicionada (se positivo) ou removida (se negativo); **Barras Adic.**, que identifica as barras modificadas, listadas por meio de concatenação com o símbolo “_”; e **Vetor Porc.**, que apresenta a porcentagem de carga acrescida ou removida de cada barra, também concatenada pelo mesmo símbolo. A coluna **Limite violado** informa os grupos de geradores nos quais foi detectada alteração no status de seus limites operacionais, enquanto o **Índice de Qualidade (Ind. de Qual.)** classifica o impacto como *MELHOR* — nos casos em que o ponto representa um retorno ao controle de tensão (para barras que inicialmente violavam os limites) — ou *PIOR*, quando indica uma perda do controle (para barras que inicialmente não apresentavam violação). A coluna **Quant. Violada** informa o número de barras de geração que ainda permanecem em condição de violação, e, por fim, a coluna **Status por barra** descreve o comportamento das tensões das barras que inicialmente foram detectadas com limites violados usando o parâmetro *tolerância de apresentação*. Desta forma, por exemplo, se inicialmente uma barra violada possuía tensão de $1,0489pu$ e com a adição/subtração de cargas a nova tensão nesta barra passa a ser $1,0491pu$, quando a tensão de controle é $1,050$, então é dito que a tensão nesta barra Aproximou (*AP*) da tensão de controle, *AF* (Afasta), para indicar que a barra se afastou

da tensão de controle, e *AP* (Aproxima), quando houve aproximação em relação a esse limite e *IG* – (Igual) quando não houve aproximação e nem afastamento em relação a esse limite (considerando *tolerância de apresentação* como a tolerância de indicação de aproximação) – as únicas barras que são avaliadas nesta última coluna são as barras que inicialmente possuem alguma violação detectada, por exemplo, no caso IEEE 30 barras, houve a detecção de apenas 3 barras de geração com limites violados e portanto apenas as tensões das três barras serão avaliados conforme seção 5.3.4 **Resultados do GoCases - IEEE 30 Barras.**

Alguns parâmetros relevantes para o prosseguimento das simulações do fluxo de potência como o “*habilitar limite de reativo*” ou ainda “*desabilitar CS*” são default do sistema GoCases - “sim” para o primeiro e “não” para o segundo. Afinal espera-se determinar a fronteira dos limites operativos das máquinas geradoras de reativo.

5.3.2 Resultados do GoCases - IEEE 9 Barras

Os resultados para as simulações do GoCases com IEEE 9 Barras consideraram limites operativos fictícios nas máquinas nas barras 2 e 3 conforme o arquivo CDF no Apêndice A uma vez que originalmente não é considerado limites operativos algum. Também foi considerado um limite de variação percentual de 100%, em todo espaço amostral e ambos os regimes (leve e pesado). O passo das combinações usado será de 1MW e podem ser salvos até 1000 casos. A tolerância da apresentação final considera até 3 casas decimais para averiguação situacional das barras que possuem violação de limites – caso haja mais de uma barra com violação de limites. Todas estas configurações estão sintetizadas Tabela 22.

É observado nas informações gerais de convergência nos metadados coletados (Tabela 23) que foram encontrados 7 pontos de regime pesado e 3 pontos de regime leve. A Tabela 24 traz algumas informações básicas do estudo inicial rodado para fins de comparação como a quantidade de violações inicialmente detectadas e quais barras são violadas. A Figura 49 traz todos os pontos detectados na curva PV.

Tabela 22: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 9 Barras

NOME DO ARQUIVO CDF	ieee9_Marcelo.cdf
TOLERÂNCIA	0,001
INVERTER TAP	Não
INVERTER TRANSFORMADOR	Não
POTÊNCIA BASE (MW)	100
LIMITE DE VARIAÇÃO PERCENTUAL DAS CARGAS	100
TIPO DO REGIME	ambos
TIPO DO ESTUDO	Todo Espaço Amostral
PASSO DAS COMBINAÇÕES (MW)	1
REDUZIR ESPAÇO AMOSTRAL	no
TAMANHO DO NOVO ESPAÇO	-
QUANTIDADE DE CASOS A SEREM SALVOS	1000
TOLERÂNCIA DE APRESENTAÇÃO	3

Fonte: autoria própria.

Tabela 23: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 9

Hora	Momento	Obs.
10h:02':50"	INICIALIZAÇÃO	
10h:02':50"	ANÁLISE COMBINATÓRIA	
10h02':50"	ANÁLISE DE PONTOS CANDIDATOS	
10h:02':51"	ANÁLISE DE FRONTEIRA	7 Pontos (Pesado); 3 Pontos (Leve)
10h:02':52"	FINALIZANDO CÁLCULO	

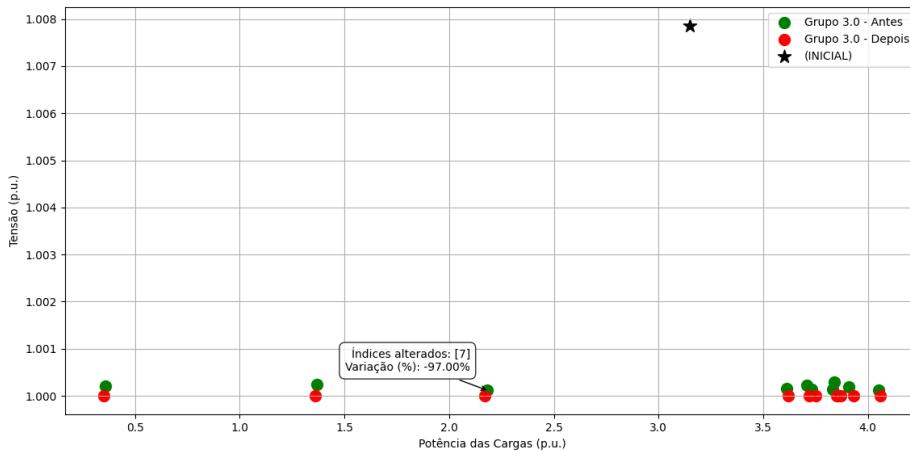
Fonte: autoria própria.

Tabela 24: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 9

ESTUDO INICIAL	ieee9_Marcelo.cdf
QUANTIDADE INICIAL DE VIOLAÇÕES - GoSimul	1 de 3
BARRAS VIOLADAS INICIALMENTE	3
TIPO DE VIOLAÇÃO	ViolaPC

Fonte: autoria própria.

Figura 49: GoCases - Resultado do estudo com IEEE 9 – Análise Gráfica



Fonte: autoria própria.

As Tabela 25 e Tabela 26 apresentam um resumo das principais características dos pontos detectados, em comparação com os dados do fluxo de potência inicial.

Tabela 25: Resultado do estudo com IEEE 9 Barras – Análise Tabular: regime leve

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor Porc. (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PQ	-98	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	-179	7_9	-54_-100	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	-280	5-7_9	-100_-65_-100	3	MELHOR	0 de 3	AP

Fonte: autoria própria.

Tabela 26: Resultado do estudo com IEEE 9 Barras – Análise Tabular: regime pesado

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PQ	47	5	52	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	57	7	57	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	91	9	73	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	60	5_7	33_30	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	70	5_9	39_28	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	78	7_9	39_31	3	MELHOR	0 de 3	AP
PQ	72	5-7_9	27_24_19	3	MELHOR	0 de 3	AP

Fonte: autoria própria.

5.3.3 Resultados do GoCases - IEEE 14 Barras

A Tabela 27 representa as características dos estudos realizados com o IEEE 14 Barras. É observado nas informações gerais de convergência nos metadados coletados (Tabela 28) que foram encontrados 544 pontos de regime pesado e 1024 pontos de regime leve. A Tabela 29 traz algumas informações básicas do estudo inicial rodado para fins de comparação como a quantidade de violações inicialmente detectadas e quais barras são violadas. A Figura 50 traz o resumo de todos os pontos no gráfico PV. A Tabela 30 e Tabela 31 apresentam um resumo das principais características de alguns dos pontos detectados, em comparação com os dados do fluxo de potência inicial.

Tabela 27: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 14 Barras

NOME DO ARQUIVO CDF	ieee14.cdf
TOLERÂNCIA	0,001
INVERTER TAP	Sim
INVERTER TRANSFORMADOR	Não
POTÊNCIA BASE (MW)	100
LIMITE DE VARIAÇÃO PERCENTUAL DAS CARGAS	100
TIPO DO REGIME	ambos
TIPO DO ESTUDO	Todo Espaço Amostral
PASSO DAS COMBINAÇÕES (MW)	1
REDUZIR ESPAÇO AMOSTRAL	no
TAMANHO DO NOVO ESPAÇO	-
QUANTIDADE DE CASOS A SEREM SALVOS	1000
TOLERÂNCIA DE APRESENTAÇÃO	3

Fonte: autoria própria.

Tabela 28: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 14

Hora	Momento	Obs.
6h:44':35"	INICIALIZAÇÃO	
6h:44':35"	ANÁLISE COMBINATÓRIA	
6h:44':45"	ANÁLISE DE PONTOS CANDIDATOS	
6h:45':36"	ANÁLISE DE FRONTEIRA	544 Pontos (Pesado); 1024 Pontos (Leve)
6h:53':34"	FINALIZANDO CÁLCULO	

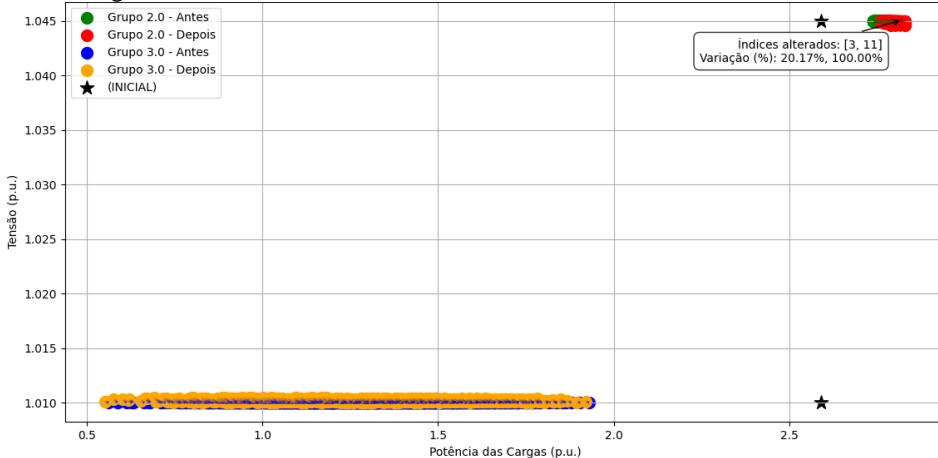
Fonte: autoria própria.

Tabela 29: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 14

ESTUDO INICIAL	ieee14.cdf
QUANTIDADE INICIAL DE VIOLAÇÕES - GoSimul	0 de 5
BARRAS VIOLADAS INICIALMENTE	-
TIPO DE VIOLAÇÃO	-

Fonte: autoria própria.

Figura 50: GoCases - Resultado do estudo com IEEE 14 – Análise Gráfica



Fonte: autoria própria.

Tabela 30: Resultado do estudo com IEEE 14 Barras – Análise Tabular: regime leve

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor Porc. (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PV	-67,0	3	71	3	PIOR	1 de 5	-
PV	-88,7	2_3	100_71	3	PIOR	1 de 5	-
PV	-103,8	3_4	59_100	3	PIOR	1 de 5	-
PQPV	-73,6	3_5	70_100	3	PIOR	1 de 5	-
PQPV	-76,2	3_6	69_100	3	PIOR	1 de 5	-

Fonte: autoria própria.

Tabela 31: Resultado do estudo com IEEE 14 Barras – Análise Tabular: regime pesado

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PV	17,0	2	78	2	PIOR	1 de 5	-
PV	24,0	3	25	2	PIOR	1 de 5	-
PQ	20,0	4	42	2	PIOR	1 de 5	-
PQ	17,0	9	58	2	PIOR	1 de 5	-
PV	20,0	2_3	46_11	2	PIOR	1 de 5	-

Fonte: autoria própria.

5.3.4 Resultados do GoCases - IEEE 30 Barras

A Tabela 32 representa as características dos estudos realizados com o IEEE 30 Barras. Para evitar combinações de muitas barras, neste caso, optou-se por reduzir o tamanho do espaço amostral em três partes iguais: barras de 1 a 10, representado pela

Figura 51; barras de 10 a 20 representados pela Figura 52; barras de 20 a 30, representados pela Figura 53. Os metadados com o tempo em cada etapa e quantidade de pontos gerados podem consultados na Tabela 33. A Tabela 34 traz algumas informações básicas do estudo inicial rodado para fins de comparação como a quantidade de violações inicialmente detectadas e quais barras são violadas. A Tabela 35 e Tabela 36 apresentam um resumo das principais características de alguns dos pontos detectados, em comparação com os dados do fluxo de potência inicial.

Tabela 32: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 30

<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	ieee30.cdf
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001
<i>INVERTER TAP</i>	Sim
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	Não
<i>POTÊNCIA BASE (MW)</i>	100
<i>LIMITE DE VARIAÇÃO PERCENTUAL DAS CARGAS</i>	100
<i>TIPO DO REGIME</i>	ambos
<i>TIPO DO ESTUDO</i>	Todo Espaço Amostral
<i>PASSO DAS COMBINAÇÕES (MW)</i>	2
<i>REDUZIR ESPAÇO AMOSTRAL</i>	yes
<i>TAMANHO DO NOVO ESPAÇO</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 1-10 • 10-20 • 20-30
<i>QUANTIDADE DE CASOS A SEREM SALVOS</i>	1000
<i>TOLERÂNCIA DE APRESENTAÇÃO</i>	3

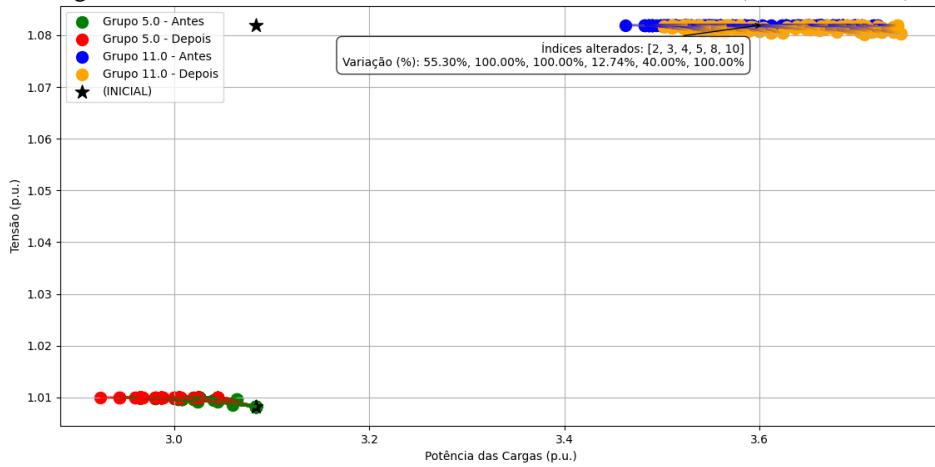
Fonte: autoria própria.

Tabela 33: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 30

BARRAS	INICIAL	ANÁLISE COMBINATÓRIA	ANÁLISE DE PONTOS CANDIDATOS	ANÁLISE DE FRONTEIRA	FINALIZANDO CÁLCULO	QUANT. DE PONTOS	FIG.
1-10	13h:06':07"	13h:06':07"	13h:06':07"	13h:06':55"	13h:12':25"	339 pesados; 241 leves;	
10-20	13h:20':22"	13h:20':23"	13h:20':23"	13h:22':29"	13h:25':54"	252 pesados; 611 leves;	
20-30	13h:58':07"	13h:58':08"	13h:58':08"	14h:00':27"	14h:05':26"	400 pesados; 785 leves;	

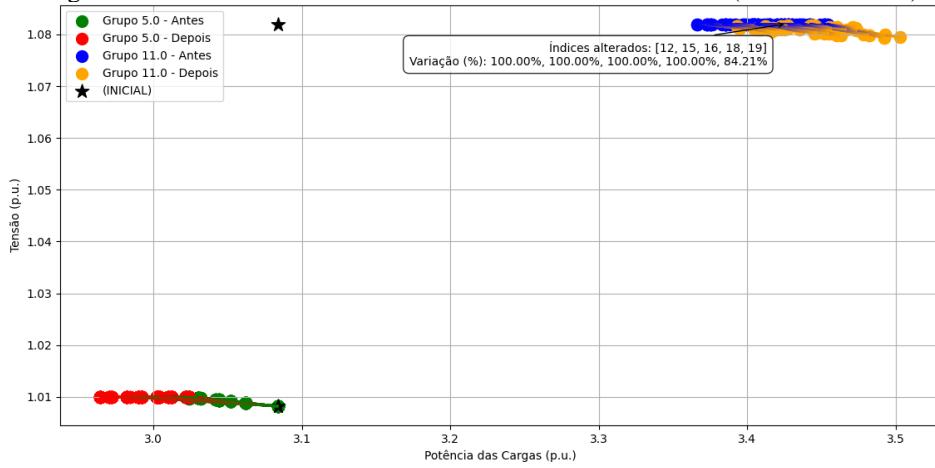
Fonte: autoria própria.

Figura 51: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Gráfica (Barras de 1-10)



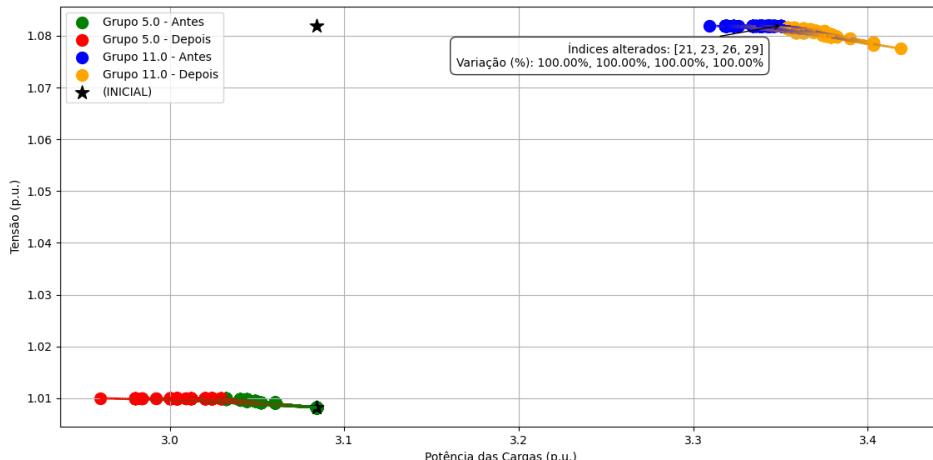
Fonte: autoria própria.

Figura 52: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Gráfica (Barras de 10-20)



Fonte: autoria própria.

Figura 53: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Gráfica (Barras de 20-30)



Fonte: autoria própria.

Tabela 34: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 30

ESTUDO INICIAL	ieee30.cdf
QUANTIDADE INICIAL DE VIOLAÇÕES - GoSimul	3 de 6
BARRAS VIOLADAS INICIALMENTE	2_5_8
TIPO DE VIOLAÇÃO	ViolaPC_ViolaPC_ViolaPC

Fonte: autoria própria.

Tabela 35: Resultado do estudo com IEEE 30 – Análise Tabular: regime leve

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor Porc. (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PV	-13	2	-60	5	MELHOR	2 de 6	AP_AP_AP
PQ	-3	5	-3	5	MELHOR	2 de 6	AP_AP_AP
PQ	-5	7	-22	5	MELHOR	2 de 6	AP_AP_AP
PQ	-7	8	-22	5	MELHOR	2 de 6	AP_AP_AP
PV	-12,4	2_3	-46_-100	5	MELHOR	2 de 6	AP_AP_AP

Fonte: autoria própria.

Tabela 36: Resultado do estudo com IEEE 30 Barras – Análise Tabular: regime pesado

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PV	46,9	5	50	11	PIOR	4 de 6	AF_AF_AF
PV	61,7	2_5	100_42	11	PIOR	4 de 6	AF_AF_AF
PQPV	48,4	3_5	100_49	11	PIOR	4 de 6	AF_AF_AF
PQPV	49,6	4_5	100_45	11	PIOR	4 de 6	AF_AF_AF
PQPV	46,8	5_7	25_100	11	PIOR	4 de 6	AF_AF_AF

Fonte: autoria própria.

5.3.5 Resultados do GoCases - IEEE 118 Barras

A v representa as características dos estudos realizados com o IEEE 30 Barras.

Para evitar combinações de muitas barras, neste caso, optou-se por reduzir o tamanho do espaço amostral em três partes iguais: barras de 1 a 10, representado pela v; barras de 10 a 20 representados pela v; barras de 20 a 30, representados pela v. Os metadados com o

tempo em cada etapa e quantidade de pontos gerados podem consultados na v. A v traz algumas informações básicas do estudo inicial rodado para fins de comparação como a quantidade de violações inicialmente detectadas e quais barras são violadas. A v e v apresentam um resumo das principais características de alguns dos pontos detectados, em comparação com os dados do fluxo de potência inicial.

Tabela 37: GoCases - Configuração do estudo com o sistema IEEE 118

<i>NOME DO ARQUIVO CDF</i>	ieee118.cdf	
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,001	
<i>INVERTER TAP</i>	Não	
<i>INVERTER TRANSFORMADOR</i>	Sim	
<i>POTÊNCIA BASE (MW)</i>	100	
<i>LIMITE DE VARIAÇÃO PERCENTUAL DAS CARGAS</i>	100	
<i>TIPO DO REGIME</i>	ambos	
<i>TIPO DO ESTUDO</i>	Todo Espaço Amostral	
<i>PASSO DAS COMBINAÇÕES (MW)</i>	2	
<i>REDUZIR ESPAÇO AMOSTRAL</i>	yes	
<i>TAMANHO DO NOVO ESPAÇO</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 1-8 • 8-16 • 16-24 • 24-32 • 32-40 • 40-48 • 48-56 • 56-64 	<ul style="list-style-type: none"> • 64-72 • 72-80 • 80-88 • 88-96 • 96-104 • 104-112 • 112-118
<i>QUANTIDADE DE CASOS A SEREM SALVOS</i>	1000	
<i>TOLERÂNCIA DE APRESENTAÇÃO</i>	3	

Fonte: autoria própria.

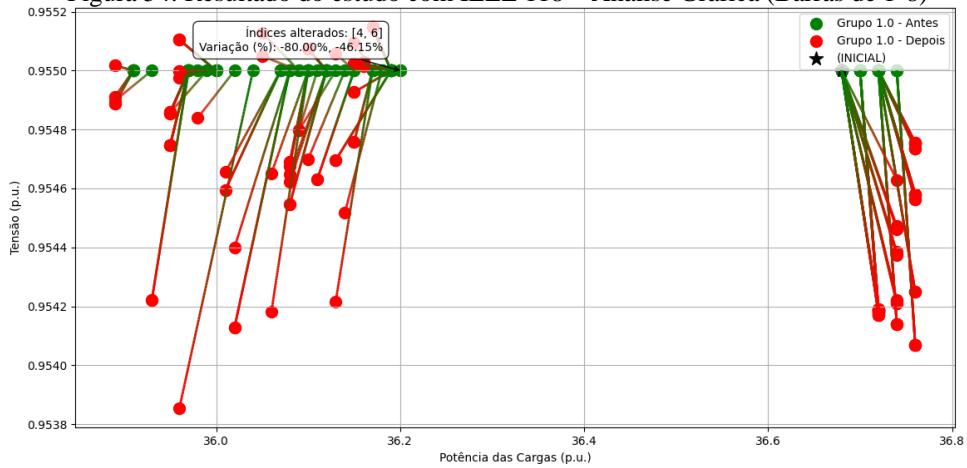
Tabela 38: GoCases - Metadados dos estudos realizados - IEEE 118

BARRAS	INICIAL	ANÁLISE COMBINATÓRIA	ANÁLISE DE PONTOS CANDIDATOS	ANÁLISE DE FRONTEIRA	FINALIZANDO CÁLCULO	QUANT. DE PONTOS	FIG.
1-8	15h:05':13"	15h:05':19"	15h:05':19"	15h:09':56"	15h:24':56"	65 pesados; 77 leves;	
8-16	16h:03':52"	16h:03':58"	16h:03':58"	16h:08':24"	16h:44':49"	34 pesados; 192 leves;	
16-24	12h:56':09"	12h:56':14"	12h:56':14"	13h:01':00"	13h:36':46"	36 pesados; 186 leves;	
24-32	13h:47':37"	13h:47':43"	13h:47':43"	13h:54':43"	13h:38':35"	156 pesados; 208 leves;	
32-40	14h:45':43"	14h:45':48"	14h:45':48"	14h:53':36"	15h:24':00"	90 pesados; 196 leves;	
40-48	18h:58':30"	18h:58':36"	18h:58':36"	19h:04':21"	19h:26':10"	255 pesados; 78 leves;	
48-56	19h:37':36"	19h:37':41"	19h:37':41"	19h:44':29"	20h:09':14"	255 pesados; 83 leves;	
56-64	20h:22':07"	20h:22':14"	20h:22':14"	20h:30':18"	21h:33':09"	156 pesados; 216 leves;	
64-72	21h:40':30"	21h:40':36"	21h:40':36"	21h:49':09"	22h:33':05"	216 pesados; 160 leves;	

BARRAS	INICIAL	ANÁLISE COMBINATÓRIA	ANÁLISE DE PONTOS CANDIDATOS	ANÁLISE DE FRONTEIRA	FINALIZANDO CÁLCULO	QUANT. DE PONTOS	FIG.
72-80	22h:41':01"	22h:41':07"	22h:41':07"	22h:47':42"	23h:07':14"	254 pesados; 90 leves;	
80-88	23h:13':16"	23h:13':22"	23h:13':22"	23h:17':37"	23h:31':18"	90 pesados; 156 leves;	
88-96	23h:44':37"	23h:44':44"	23h:44':44"	23h:50':09"	00h:26':35"	90 pesados; 188 leves;	
96-104	00h:38':33"	00h:38':39"	00h:38':39"	00h:42':53"	01h:08':14"	36 pesados; 170 leves;	
104-112	11h:34':56"	11h:35':03"	11h:35':03"	11h:41':03"	12h:20':35"	90 pesados; 182 leves;	
112-118	12h:34':08"	12h:34':13"	12h:34':13"	12h:35':56"	12h:39':03"	39 pesados; 32 leves;	

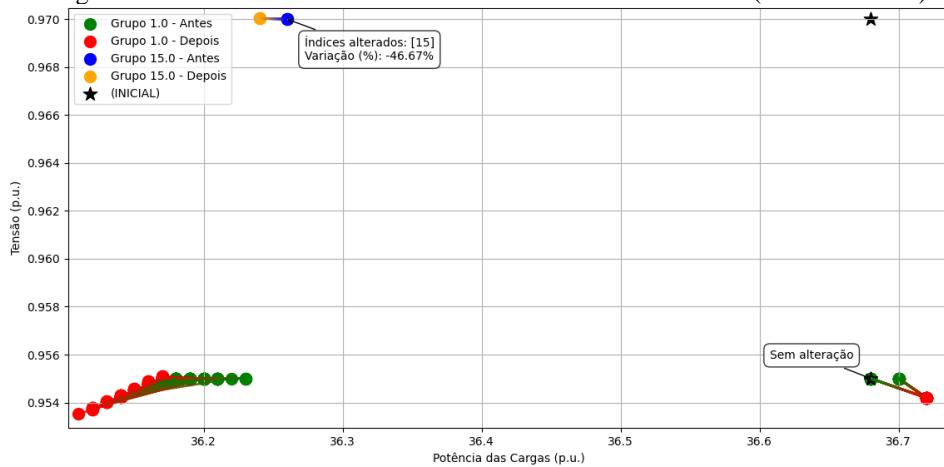
Fonte: autoria própria.

Figura 54: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 1-8)

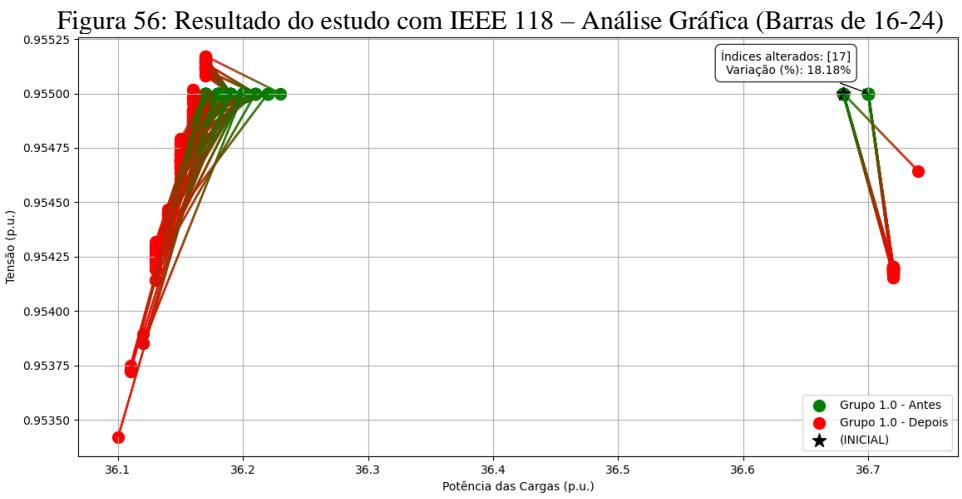


Fonte: autoria própria.

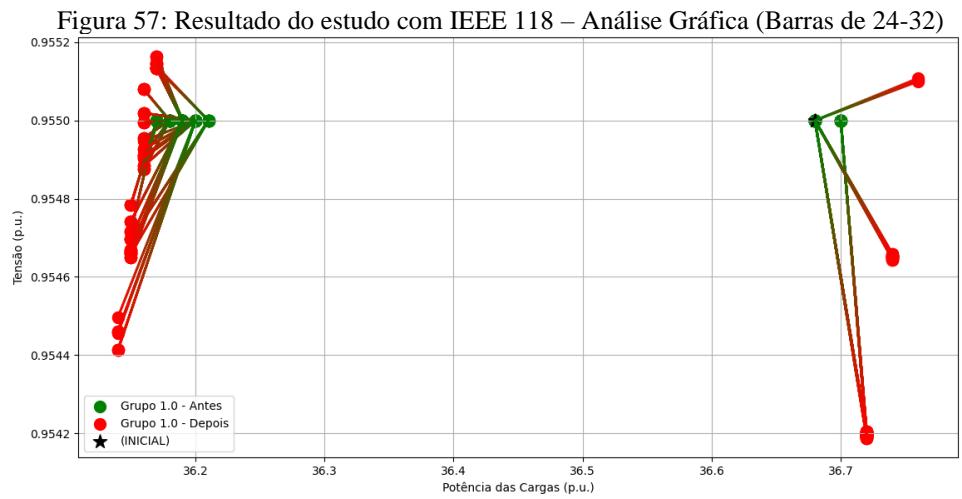
Figura 55: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 8-16)



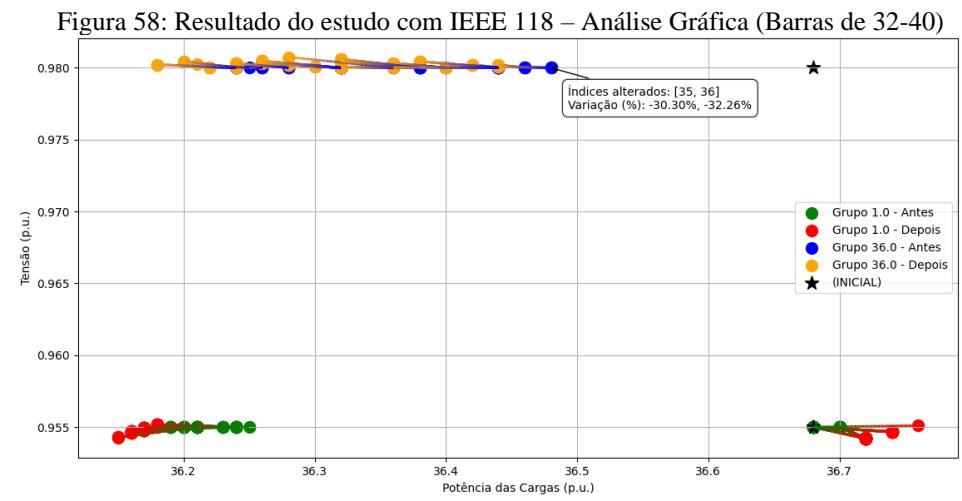
Fonte: autoria própria.



Fonte: autoria própria.

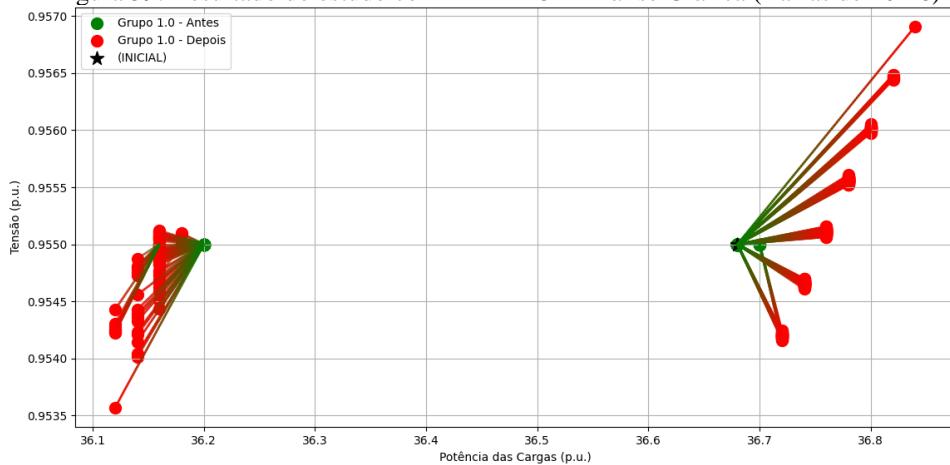


Fonte: autoria própria.



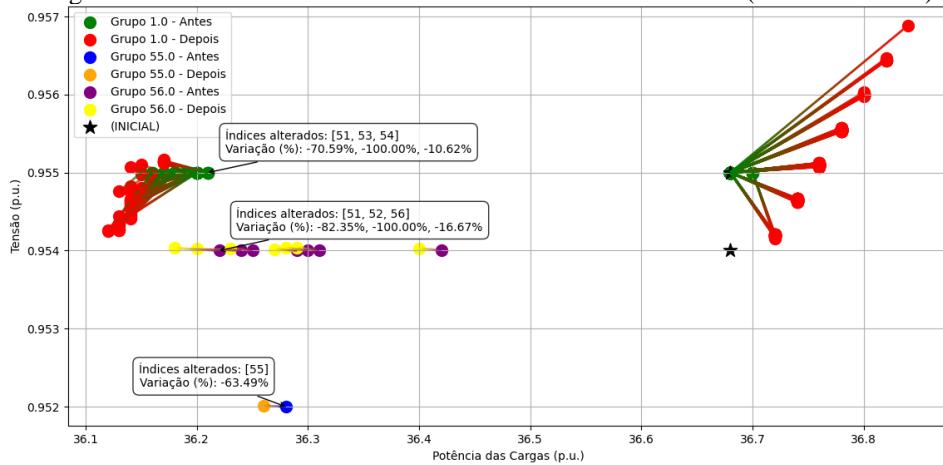
Fonte: autoria própria.

Figura 59: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 40-48)



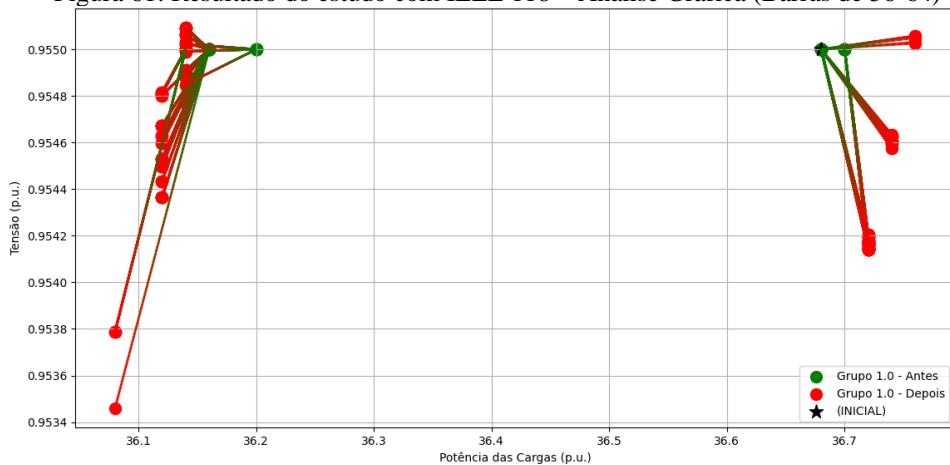
Fonte: autoria própria.

Figura 60: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 48-56)



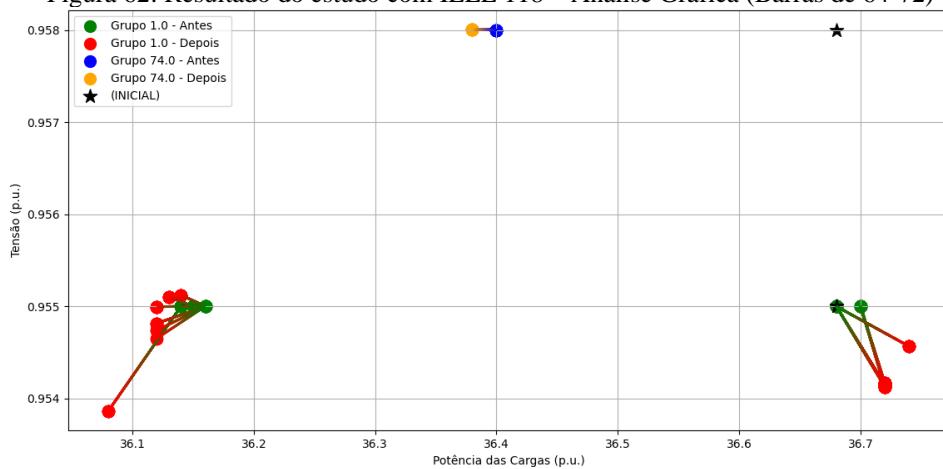
Fonte: autoria própria.

Figura 61: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 56-64)



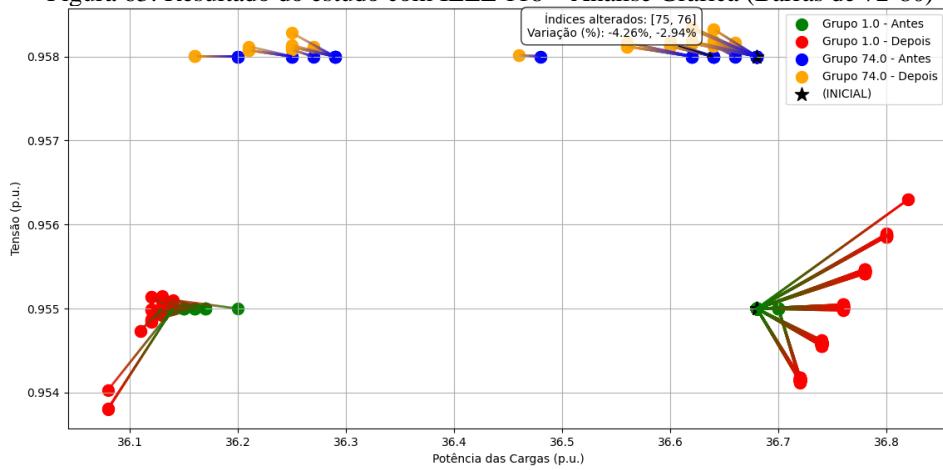
Fonte: autoria própria.

Figura 62: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 64-72)



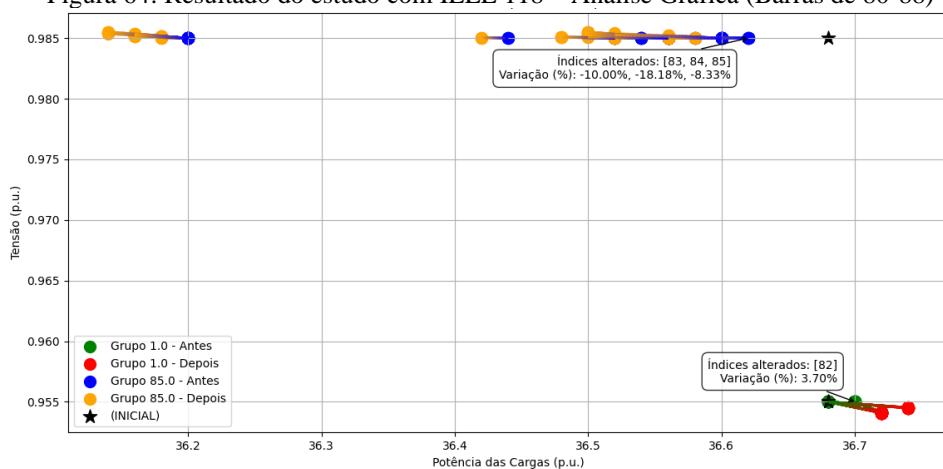
Fonte: autoria própria.

Figura 63: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 72-80)



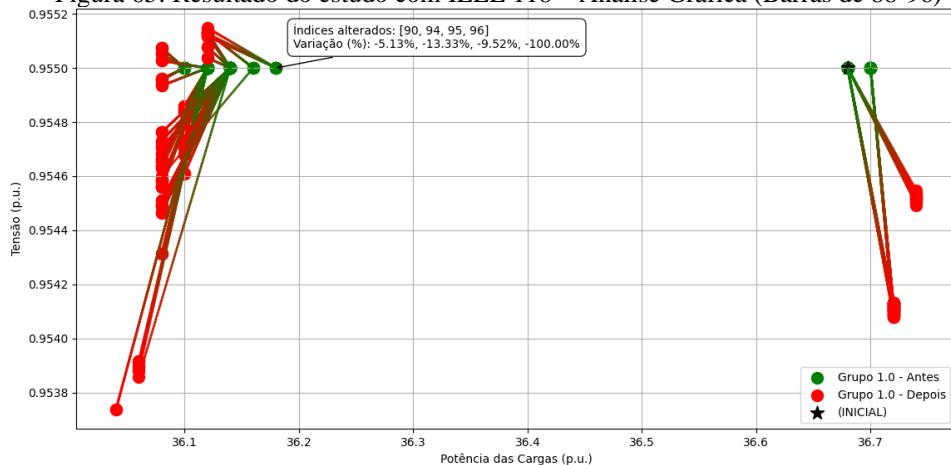
Fonte: autoria própria.

Figura 64: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 80-88)



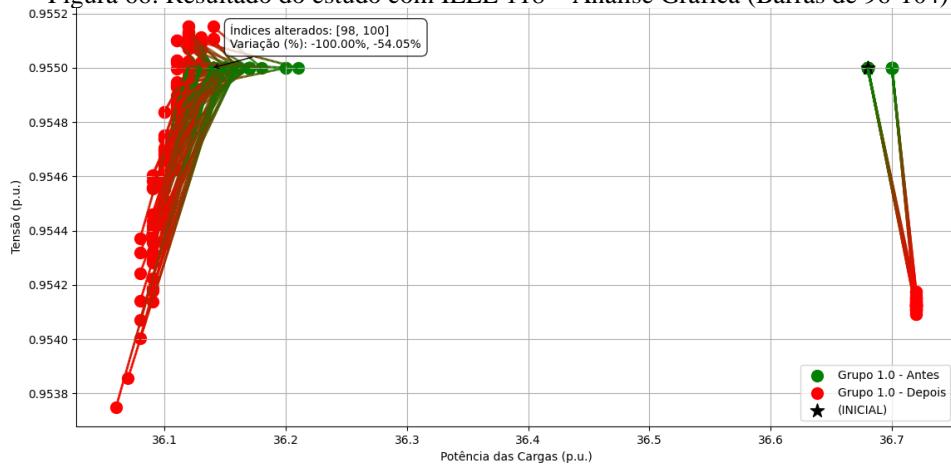
Fonte: autoria própria.

Figura 65: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 88-96)



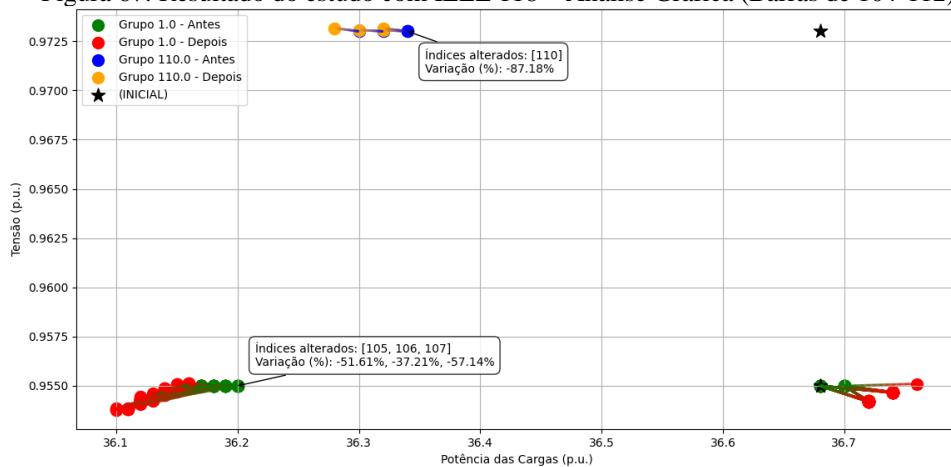
Fonte: autoria própria.

Figura 66: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 96-104)



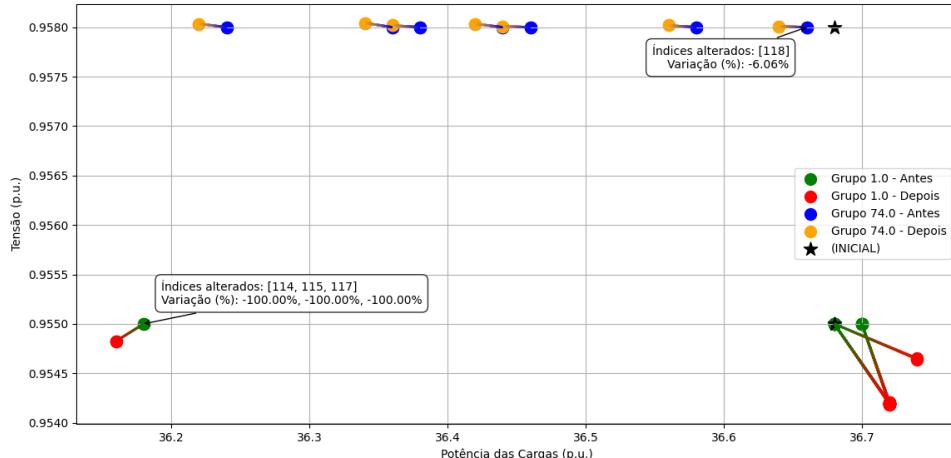
Fonte: autoria própria.

Figura 67: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 104-112)



Fonte: autoria própria.

Figura 68: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Gráfica (Barras de 112-118)



Fonte: autoria própria.

Tabela 39: GoCases - Informações básicas do estudo inicial - IEEE 118

<i>ESTUDO INICIAL</i>	<i>ieee118.cdf</i>
<i>QUANTIDADE INICIAL DE VIOLAÇÕES - GoSimul</i>	9 de 54
<i>BARRAS VIOLADAS INICIALMENTE</i>	19
<i>TIPO DE VIOLAÇÃO</i>	

Fonte: autoria própria.

Tabela 40: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Tabular: regime leve

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor Porc. (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PQPV	-58	2_6	-100_-73	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PV	-52	11	-74	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQ	-44	15	-49	15	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	-52	11_15	-37_-29	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQ	-51	17_18	-100_-67	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PV	-52	27	-84	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	-36	33_36	-78_-58	36	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	-56	44_46_47	-88_-100_-41	1	PIOR	10 de 54	IG_AP_IG_IG_IG AP_IG_IG_IG
PV	-41	50_56	-100_-29	56	PIOR	10 de 54	IG_AP_IG_IG_IG AP_IG_IG_IG
PV	-30	70	-45	74	PIOR	10 de 54	IG_AP_IG_IG_IG AP_IG_IG_IG
PQ	-16	82_85	-15_-33	85	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG AP_IG_IG_IG
PQPV	-60	92_94_95	-31_-67_-48	1	PIOR	10 de 54	IG_AP_IG_IG_IG AP_AF_IG_IG
PQPV	-58	98_101_103	-100_-55_-52	1	PIOR	10 de 54	IG_AP_IG_IG_IG AP_IG_AP_IG
PQ	-38	109_110	-100_-77	110	PIOR	10 de 54	IG_AP_IG_IG_IG

							AP_AP_AP_AP_AP_AP
PQ	-12	114_118	-100_-12	74	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG_IG_IG

Fonte: autoria própria.

Tabela 41: Resultado do estudo com IEEE 118 – Análise Tabular: regime pesado

Tag	Pot. P Adic. (MW)	Barras Adic.	Vetor Porc. (%)	Limite violado	Ind. de Qual.	Quant. Violada	Status das outras barras
PQPV	6	2	30	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQ	4	11	6	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	4	17_18	18_3	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PV	4	27	6	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	4	33_36	9_3	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	6	44_46_47	12_7_6	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	8	50_52_55_56	12_11_3_2	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PV	4	70	6	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQ	4	82_85	4_8	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	6	92_94_95	3_7_5	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PV	4	90	5	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQ	4	97	27	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQPV	6	108_109_110	100_25_5	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_AF_AF_IG
PQPV	4	105_106	6_5	1	PIOR	10 de 54	IG_IG_IG_IG_IG IG_IG_IG_IG
PQ	4	114_115	25_6	1	PIOR	10 de 54	IG_AP_AP_AP_AP_AP IG_IG_IG_IG_IG

Fonte: autoria própria.

6. *GoCurvs – GENERATOR OF CURVES*

6.1 Considerações Iniciais

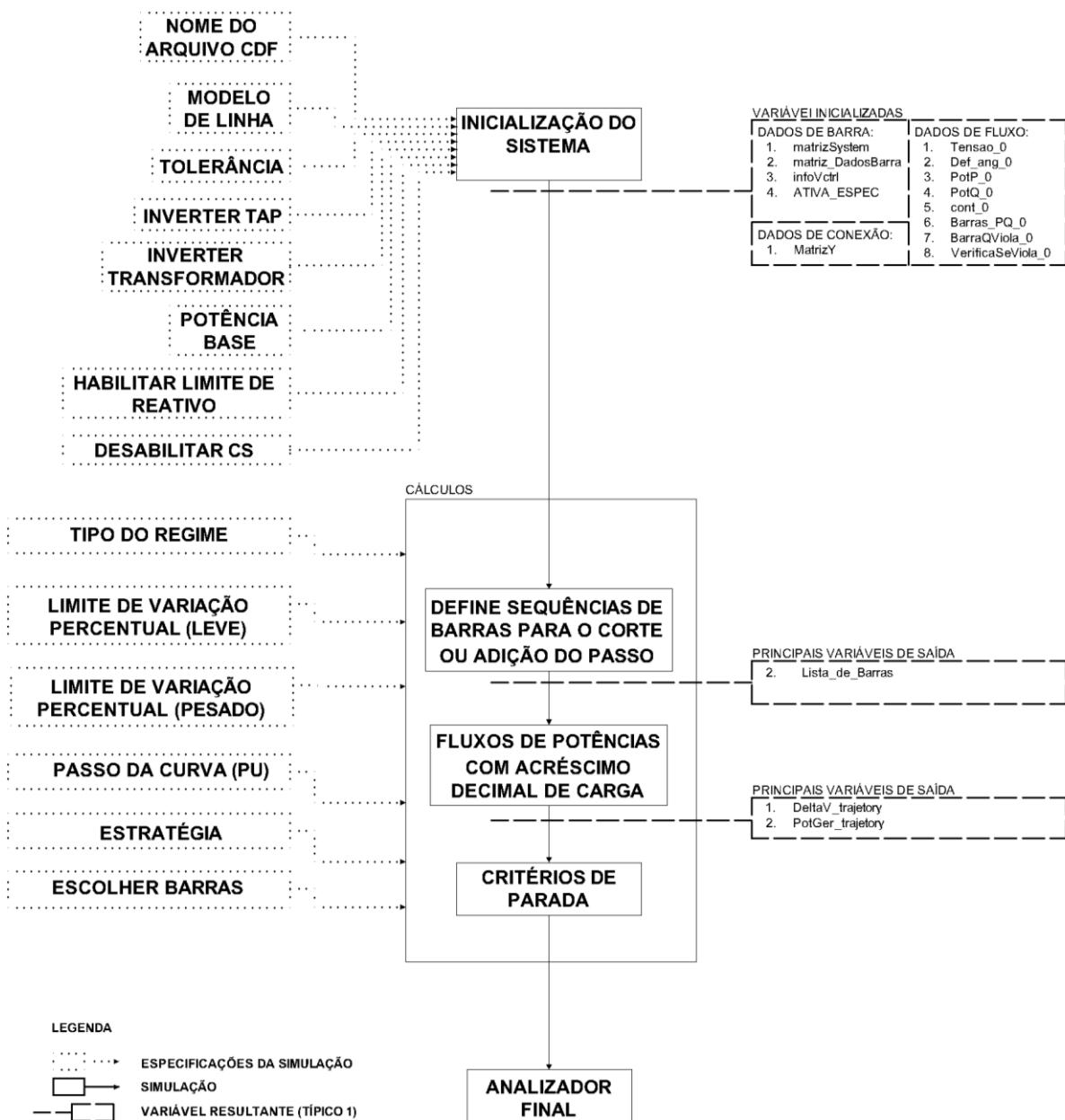
Com o intuito de entender de forma geral a formação da curva PV e seus limites, o fluxograma presente na Figura 1Figura 69 foi elaborado para explicar o desenvolvimento do terceiro e último analisador ou gerador que compõe os estudos, isto é, o *Generator of Curves*.

Assim como no **GoCases** (seção 5. *GoCases – GENERATOR OF CASES*) o **GoCurvs** inicia-se com uma **inicialização do sistema** caso 0, isto é, determina o fluxo de potência inicial do arquivo CDF escolhido para referências futuras.

A seção de **cálculos** que depende da seleção de parâmetros iniciais como *tipo de regime*, se “*pesado*”, “*leve*” ou “*ambos*”; como *limites de variação percentual*, registrando a variação percentual máxima permitida às cargas ativas - este parâmetro deve ser preenchido conforme o tipo de regime, ou seja, *limites de variação percentual (leve)* é para o regime “*leve*” ou “*ambos*” e *limites de variação percentual (leve)* para o regime “*pesado*” ou “*ambos*”; “*passo*” da curva (*pu*), que determina a precisão de corte ou adição de carga ao gerar os pontos da curva PV; *estratégia* define a lista de barras prioridades para cortes ou adição de cargas para a coleção dos pontos da curva PV e que pode ser de dois tipos: “*MAIORES*” ou “*ESCOLHER*” – se “*MAIORES*” então o algoritmo desenvolve automaticamente a “*lista_de_Barras*” procurando pelas barras de maior impacto e que podem ser alteradas primeiro; e por fim, *escolher barras* que é usado para o preenchimento das barras caso o usuário opte por “*ESCOLHER*” como estratégia a ser seguida.

Por fim, é montada a curva PV no **analisador de resultados**. A curva PV também é completamente salva para futuras **análises em X**.

Figura 69: Fluxograma Geral GoCurvs - Generator of Curves



Fonte: autoria própria.

6.2 Cálculos

Os **cálculos** referem-se a forma como são coletados os pontos da curva PV para os sistemas escolhidos e depende principalmente da estratégia adotada. Se o estudo selecionado for do tipo “MAIORES”, a identificação das barras prioritárias parte da execução de sequências de fluxo de potência em que uma das cargas é aumentada ou reduzida pelo valor do “passo”, conforme o regime adotado. A partir da comparação

entre as tensões resultantes (ΔV_{calck}) e as tensões do caso base (ΔV_{0k}), determina-se a *lista_de_barras* a ser utilizada. Essa comparação é válida apenas para barras do tipo PQ, uma vez que as tensões controladas em barras PV e swing permanecem invariáveis, tornando a análise ineficaz nesses casos. A equação 59 é a responsável pela comparação entre as tensões do caso base (fluxo 0) e a tensão calculada no fluxo de potência desta etapa.

$$Erro_k = \Delta V_{0k} - \Delta V_{calck} \quad (59)$$

Onde:

$Erro_k$: Erro por barra k calculado para fins de comparação entre barras.

ΔV_{0k} : Tensões do caso base (estudo inicial).

ΔV_{calck} : Tensões calculadas na etapa de formação de listas de barras.

Com a lista de barras definida, cada barra é ajustada individualmente — por adição ou subtração do “passo” — até atingir os limites de variação estabelecidos, geralmente expressos em termos percentuais. A cada incremento ou decréscimo aplicado, um novo fluxo de potência é executado, e os resultados são armazenados. As tensões de todas as barras são salvas na variável *DeltaV_trajectory*, enquanto a soma, em pu, das potências ativas das cargas é registrada na variável *PotGer_trajectory*. O processo é interrompido quando algum critério de parada for atingido. Caso todas as barras PQ da lista sejam percorridas sem ativar nenhum critério de interrupção, o algoritmo passa a considerar também as cargas associadas às barras PV, que são então adicionadas à lista de alterações subsequentes.

Entretanto, caso a estratégia adotada seja a de selecionar manualmente as barras a serem alteradas — ou seja, a estratégia “*ESCOLHER*” —, é necessário indicar explicitamente quais barras serão modificadas. Diferente da estratégia “*MAIORES*”, na qual cada barra listada é levada ao seu limite antes de se iniciar a alteração da próxima, a estratégia “*ESCOLHER*” aplica o valor do “passo” sequencialmente a cada barra escolhida, uma de cada vez, antes da execução do fluxo de potência.

Os critérios de parada adotados são dois: se atingiu com sucesso o *limite percentual* em todas as cargas alvos ou se foi atingido o *limite máximo* de potência devido ao **colapso de tensão** – isto é, foi alcançado o “nariz” da curva PV a partir da qual qualquer acréscimo de potência na carga causaria instabilidades e divergências.

6.3 Analisador Final

6.3.1 Considerações Iniciais

É importante ressaltar que há diversas possibilidades para a geração das curvas PV, uma vez que existem múltiplas formas de se alterar o sistema. A estratégia de adição ou subtração de cargas ou geração influencia diretamente na trajetória das variações de tensão e, consequentemente, no formato da curva gerada. Neste trabalho, foram montadas diversas curvas PV para os quatro sistemas em análise, nas quais foram aplicadas alterações nas potências ativas de carga e de geração. Também foi analisado o impacto do aumento dos limites de geração de potência reativa das unidades geradoras (compensadores síncronos, geradores ou qualquer outra fonte com capacidade de controle de reativo).

Assim como nas figuras do ***GoSimul***, as figuras geradas no ***GoCurvs*** em Python utilizam um conjunto de bibliotecas que oferecem recursos interativos, como a exibição dinâmica de legendas ao posicionar o cursor sobre as curvas. Foi também implementado um sistema de filtragem diretamente nas figuras, especialmente útil para sistemas com grande número de barras, como os sistemas IEEE de 30 e 118 barras. A relação completa das bibliotecas utilizadas encontra-se na **Seção X**.

Nas figuras, além das estrelas que marcam o instante inicial da tensão de cada barra com base no nível de carregamento do CDF original, há também uma marcação com pontos que indica os limites de controle de tensão para as barras PV que apresentaram violação desses limites.

Neste estudo, serão denominadas “barras críticas” aquelas que tiverem seus limites de geração de reativo ultrapassados em algum momento antes de se atingir o “nariz” da curva PV.

Todos os dados de entrada e combinações possíveis dos estudos estão sintetizados na Tabela 42.

Tabela 42: GoCurvs - Resumo das características dos estudos que podem ser realizados

ENTRADA	TIPO DA ENTRADA	COMENTÁRIOS
ARQUIVO CDF	1. <i>ieee9_Marcelo.cdf</i> 2. <i>ieee14.cdf</i> 3. <i>ieee30.cdf</i> 4. <i>ieee118.cdf</i>	<ul style="list-style-type: none"> O sistema IEEE 9 barras possui como referência o trabalho de X.
TOLERÂNCIA	0,001	
INVERTER TAP	1. Não 2. Sim	
GIRAR TRANSFORMADOR	1. Não 2. Sim	
S BASE (MVA)	100	
AVALIAR LIMITE DE REATIVO	1. Não 2. Sim	
DESABILITAR CS	1. Não 2. Sim	
LIMITE LEVE		<ul style="list-style-type: none"> Limite máximo de remoção de potência ativa das cargas. Apenas se TIPO DO REGIME for “ambos”.
LIMITE PESADO		<ul style="list-style-type: none"> Limite máximo de adição de potência ativa das cargas. Apenas se TIPO DO REGIME for “ambos”.
LIMITE GERAL		<ul style="list-style-type: none"> Limite máximo de adição de potência ativa das cargas. Apenas se TIPO DO REGIME for “leve” ou “pesado”.
TIPO DO REGIME	1. leve 2. pesado 3. ambos	<ul style="list-style-type: none"> O regime “leve” leva a uma diminuição das potências ativas das cargas; O regime “pesado” leva a um aumento; O regime “ambos” averigua os dois regimes anteriores – desenho completo da curva.
PASSO DE VARIAÇÃO (pu)	-	<ul style="list-style-type: none"> O passo das combinações refere-se ao passo que será acrescido as cargas para a determinação da curva PV. definem a precisão da curva
ESTRATÉGIA	1. MAIORES 2. ESCOLHER	<ul style="list-style-type: none"> Define a estratégia a ser seguida para definir quais barras e qual ordem de acréscimo ou decréscimo do passo às cargas; “Maiores” define a lista de barras de cargas a alterar com base nas barras PQ que levam aos maiores desvio da tensão inicial; cada barra da lista montada é levada ao seu limite de uma vez antes de prosseguir para a próxima barra da lista. “Escolher” define a lista de barras de cargas com base na entrada do usuário; a ordem de acréscimo ou decréscimo se esta estratégia for seguida será em todas as barras da lista sequencialmente.
BARRAS ESCOLHIDAS	1. “1-5” 2. “1-2_5-8”	<ul style="list-style-type: none"> Apenas se a Estratégia adotada for “Escolher”; “1-5” significa que o estudo é composto das barras de 1 a 5. “1-2_5-8” significa que o estudo é composto das barras de 1 a 2 e de 5 a 8.
MODELO DE LINHA	1. PI 2. T	
LÓGICA SUPLEMENTAR	1. 0 2. 1 3. 2	<ul style="list-style-type: none"> Lógica suplementar 0 significa sem lógica suplementar. Lógica suplementar 1 impede a comutação máxima de todas as barras de difíceis identificação. Lógica suplementar 2 impede a comutação máxima apenas da primeira barra de difícil identificação detectada.
COMUTAÇÃO MÁXIMA	-	<ul style="list-style-type: none"> Apenas preencher com um inteiro quando a lógica suplementar for 1 ou 2. Veja item X.

Fonte: autoria própria.

Ressalta-se, no entanto, que essas configurações correspondem aos parâmetros que podem ser ajustados diretamente na interface gráfica dos simuladores desenvolvidos, não sendo os únicos parâmetros que influenciam os estudos. Alguns desses parâmetros provêm do arquivo CDF, como as configurações iniciais dos sistemas, enquanto outros são definidos por padrão, como a quantidade máxima de iterações permitidas (200 iterações), e só podem ser alterados diretamente no código-fonte dos simuladores.

6.3.2 Resultados do GoCurvs - IEEE 9 Barras

A Tabela 43 resume as características gerais que deverão ser consideradas durante todos os eventos aplicados no estudo com o sistema IEEE 9 barras. A Tabela 44, entretanto, traz as características que foram alteradas a fins de gerar diferentes combinações de curvas PV nas figuras de Figura 72 a Figura 78 para análises.

Tabela 43: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 9 – Características Gerais

<i>INVERTER TAP</i>	Não
<i>GIRAR TRAFO</i>	Não
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,0001
<i>S BASE (MVA)</i>	100
<i>DESABILITAR CS</i>	Não
<i>LIMITE LEVE</i>	100
<i>LIMITE PESADO</i>	100
<i>LIMITE GERAL</i>	100
<i>TIPO DO REGIME</i>	ambos
<i>PASSO DE VARIAÇÃO (pu)</i>	0,02
<i>MODELO DE LINHA</i>	PI
<i>ESTRATÉGIA</i>	Maiores
<i>BARRAS ESCOLHIDAS</i>	-
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	0
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	-

Fonte: autoria própria.

Tabela 44: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 9 – Características alteradas

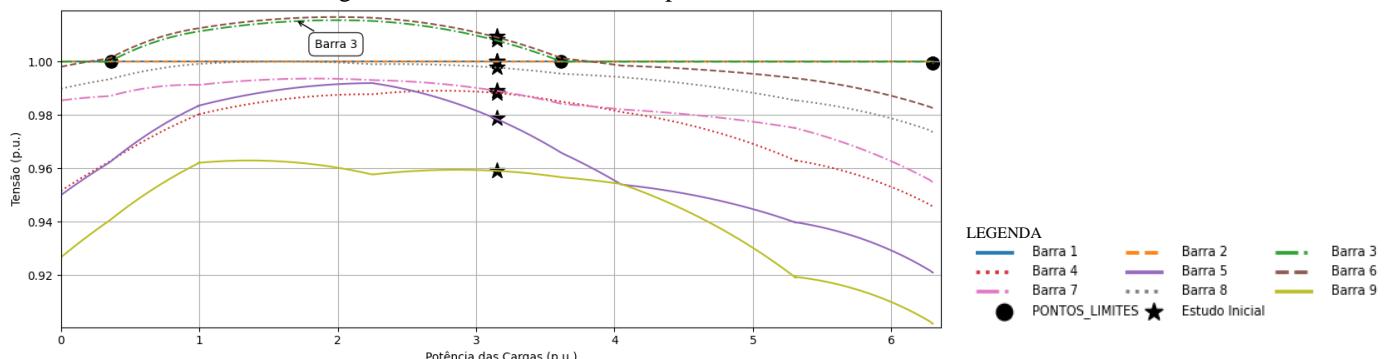
<i>FIGURAS</i>	<i>ARQUIVO CDF</i>	<i>AVALIAR LIM. DE REATIVO</i>	<i>OBSERVAÇÃO</i>
Figura 70 Figura 71	ieee9_Marcelo.cdf	Sim	<ul style="list-style-type: none"> Arquivo CDF original.
Figura 72	ieee9_Marcelo_T10.cdf	Sim	<ul style="list-style-type: none"> Maiores limites de geração de reativo nas barras 2 e 3: <ul style="list-style-type: none"> Barra 2: original = [-40,50] MVAr, novo = [-40,100] MVAr Barra 3: original = [0,50] MVAr, novo = [-40,100] MVAr
Figura 73	ieee9_Marcelo.cdf	Não	<ul style="list-style-type: none"> Arquivo CDF original.
Figura 74	ieee9_Marcelo_T20.cdf	Sim	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de potência ativa de carga da barra 7: <ul style="list-style-type: none"> Barra 7: original = 100MW, novo = 200MW Colapso de tensão detectado: <p style="text-align: center;"> $P_{inicial}: 4,15\mu$ $P_{colapso}: 6,62\mu$ $P_{margem}: 2,37\mu$ </p>

FIGURAS	ARQUIVO CDF	AVALIAR LIM. DE REATIVO	OBSERVAÇÃO
Figura 75	ieee9_Marcelo_T21.cdf	Sim	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de potência ativa de carga da barra 7 e 9. <ul style="list-style-type: none"> - Barra 7: original = 100MW, novo = 200MW - Barra 9: original = 125MW, novo = 240MW Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 5,30pu$ $P_{colapso}: 6,34pu$ $P_{margem}: 0,94pu$
Figura 76	ieee9_Marcelo_T30.cdf	Sim	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de potência ativa de geração da barra 2 e 3. <ul style="list-style-type: none"> - Barra 2: original = 163MW, novo = 220MW - Barra 3: original = 85MW, novo = 100MW
Figura 77	ieee9_Marcelo_T31.cdf	Sim	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de potência ativa de geração da barra 2 e 3. <ul style="list-style-type: none"> - Barra 2: original = 163MW, novo = 220MW - Barra 3: original = 85MW, novo = 150MW
Figura 78	ieee9_Marcelo_T32.cdf	Sim	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de potência ativa de geração da barra 2 e 3. <ul style="list-style-type: none"> - Barra 2: original = 163MW, novo = 230MW - Barra 3: original = 85MW, novo = 200MW Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 4,33pu$ $P_{colapso}: 6,34pu$ $P_{margem}: 1,08pu$

Fonte: autoria própria.

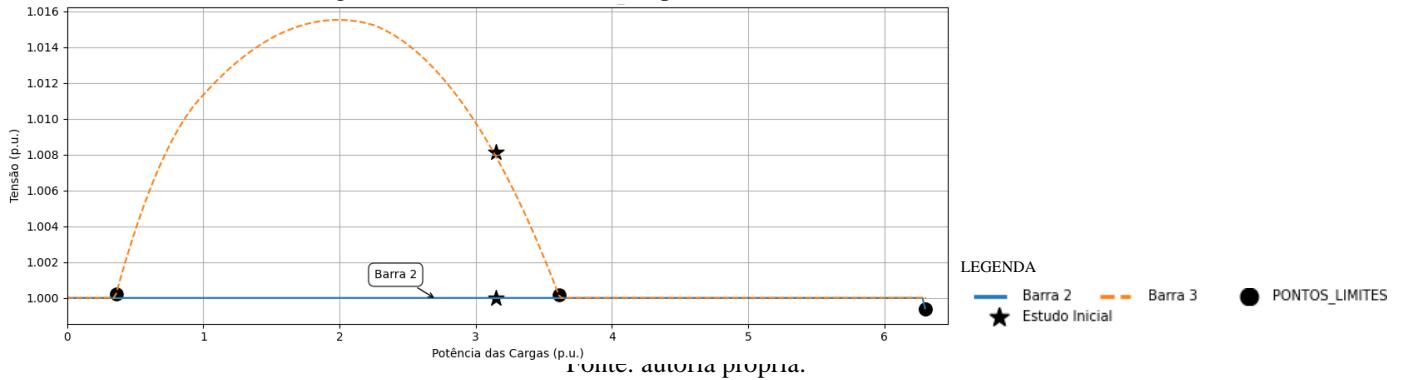
As primeiras curvas PV geradas seguem um acréscimo e decréscimo de carga ativa das barras de maiores impactos (estratégia “MAIORES”) até o limite máximo de 100% de alteração da carga do sistema IEEE 9 Barras conforme configurações de carga inicialmente dados pelo arquivo CDF original (Apêndice A). A Figura 70 e Figura 71 representam o desenho das curvas PV para todas as barras e apenas para as “barras críticas” respectivamente.

Figura 70: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: todas as barras



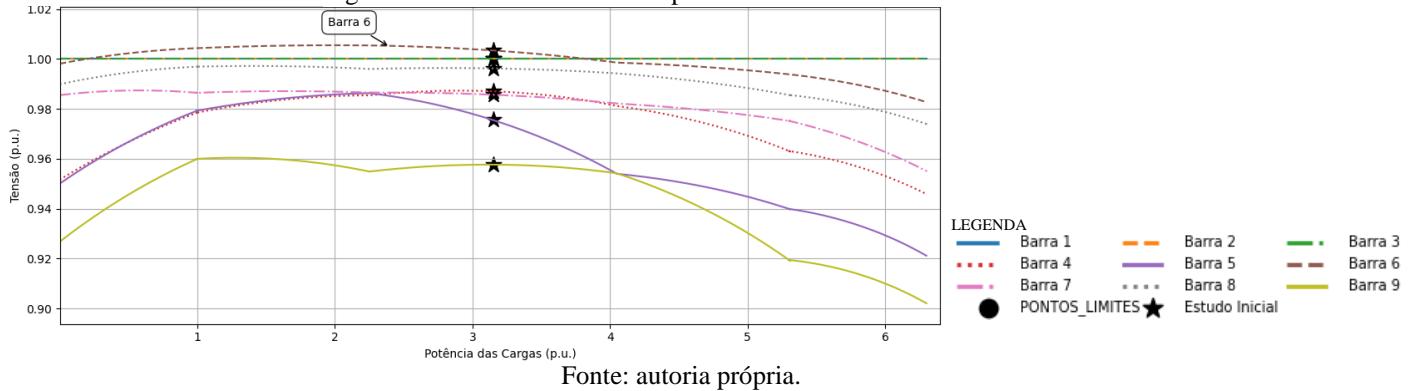
Fonte: autoria própria.

Figura 71: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9 Barras: barras críticas



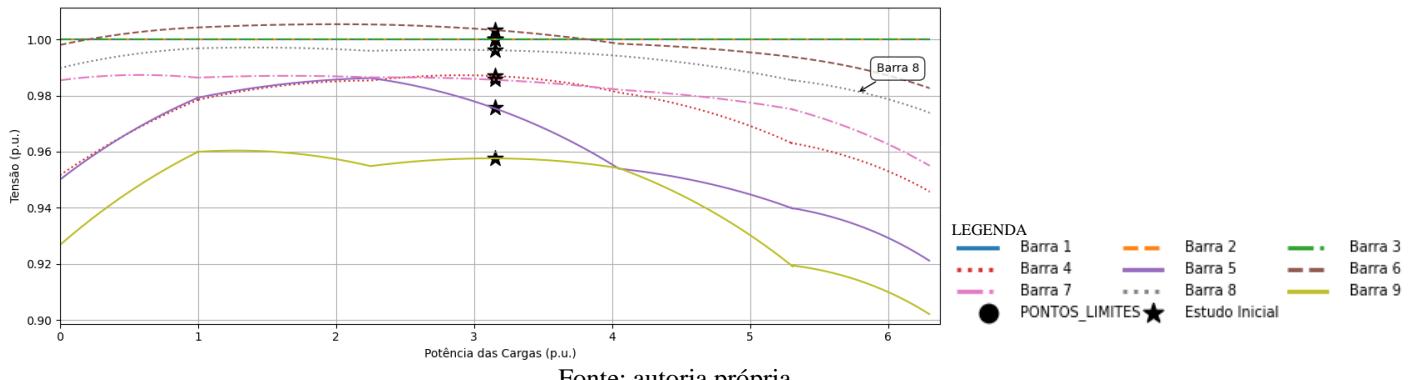
As duas figuras a seguir (Figura 72 e Figura 73) apresentam as curvas PV tracejadas para todas as barras do mesmo sistema CDF inicialmente avaliado, com a única diferença de que, na Figura 72, foi realizada uma ampliação dos limites de geração de potência reativa das unidades geradoras identificadas como críticas (teste T10), enquanto Figura 73 não foi permitida a avaliação de limite de injeção de potência reativa (teste T11). Observa-se que essas duas abordagens produzem os mesmos impactos sobre o perfil de tensão contribuindo diretamente para o aumento da margem de estabilidade de tensão além de menores quedas de tensão.

Figura 72: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9: teste T10



Fonte: autoria própria.

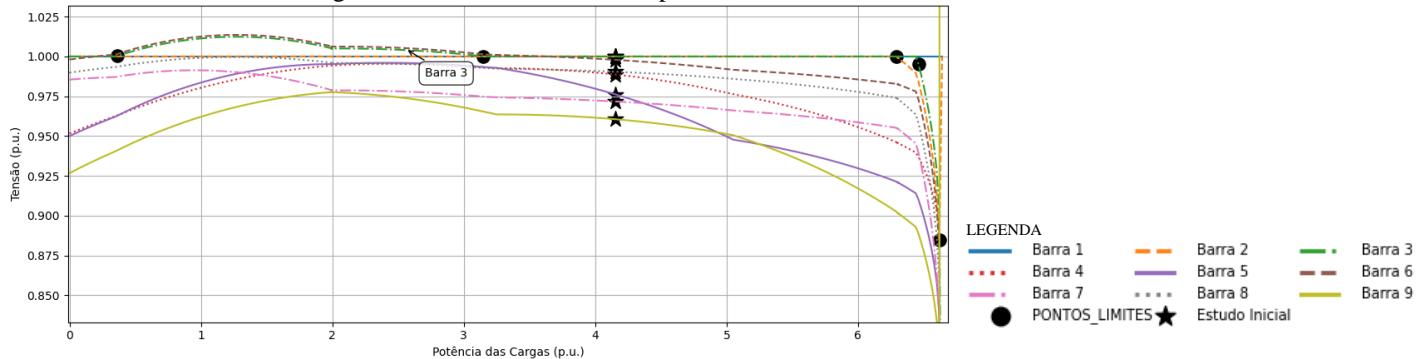
Figura 73: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9: teste T11



Os testes T20 e T21 foram realizados com base no arquivo CDF original, avaliando os limites de potência reativa definidos inicialmente, conforme as configurações descritas nas Tabela 43 e Tabela 44. A única diferença entre esses testes está nas potências ativas de carga adotadas no início do estudo. A Figura 74 apresenta as curvas PV de todas as barras, considerando o sistema IEEE de 9 barras com aumento inicial da potência ativa na barra 7. Já a Figura 75 mostra as curvas PV do mesmo sistema, mas com aumentos simultâneos nas potências ativas das barras 7 e 9. Em ambas é possível notar que, a depender da configuração de carga, o sistema pode ter diferentes configurações de queda tensão – por exemplo, as tensões das barras 7 e 5 tem uma leve mudança de posição entre elas. Diferentes quedas de tensões levam a diferentes margens de estabilidade de tensão, portanto, cada configuração de sistema é única e possui quedas e margens únicas sobre a tensão.

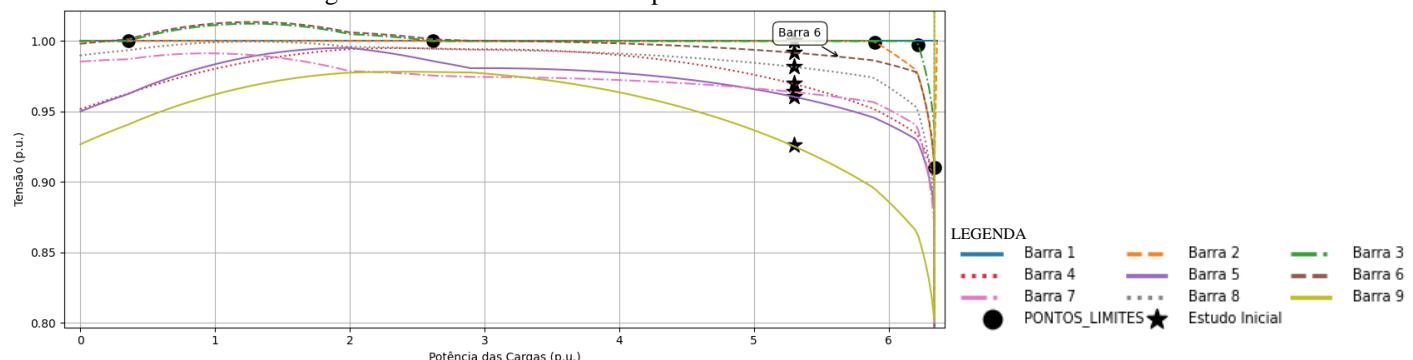
Os testes finais, T30, T31 e T32, também foram conduzidos com base no arquivo CDF original, mantendo os limites de potência reativa inalterados, e utilizando as mesmas configurações das Tabela 43 e Tabela 44. A diferença está nas potências ativas de geração das demais unidades geradoras do sistema. Na prática, essa alteração tem o efeito de "aliviar" a barra swing, redistribuindo o suprimento das cargas e das perdas nos equipamentos de transmissão no cálculo do fluxo de potência como. Como consequência, essa estratégia também influencia diretamente nas quedas de tensão e nos momentos aos quais são observados os fenômenos de colapso de tensão – este momento é caracterizado pelo total das cargas considerada como **potência de colapso** ($P_{colapso}$). A distância entre os níveis atuais da potência de carga ($P_{inicial}$) a potência de colapso é chamada de **margem de estabilidade de tensão** (P_{margem}).

Figura 74: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9: teste T20



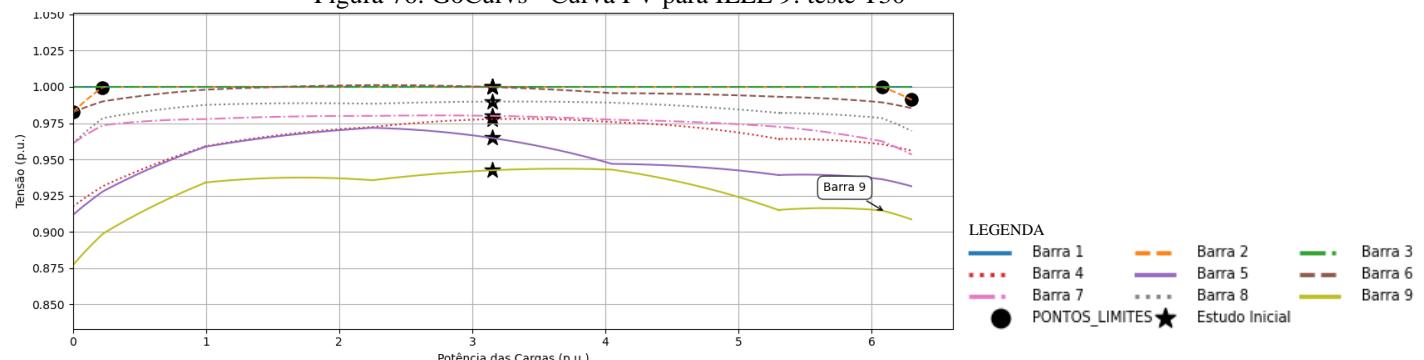
Fonte: autoria própria.

Figura 75: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9: teste T21



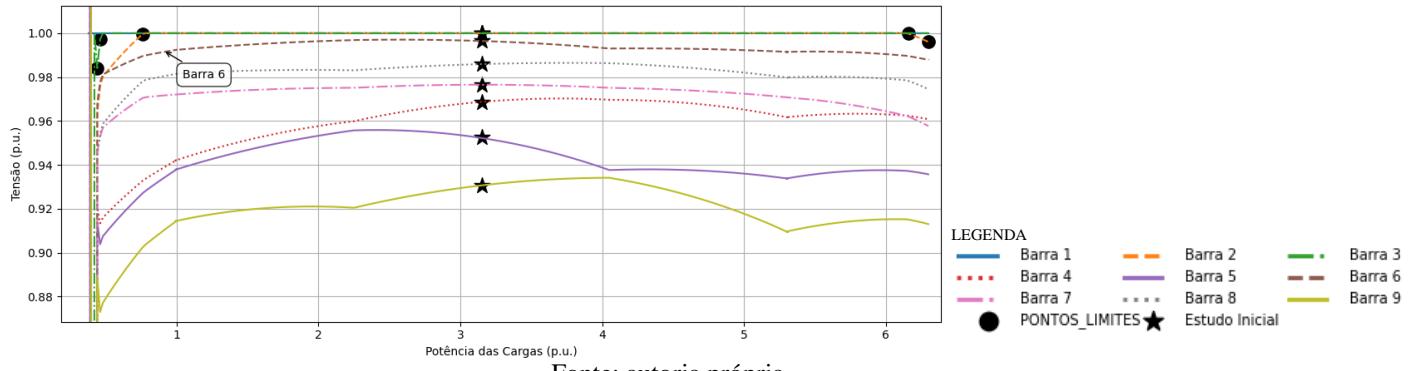
Fonte: autoria própria.

Figura 76: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9: teste T30



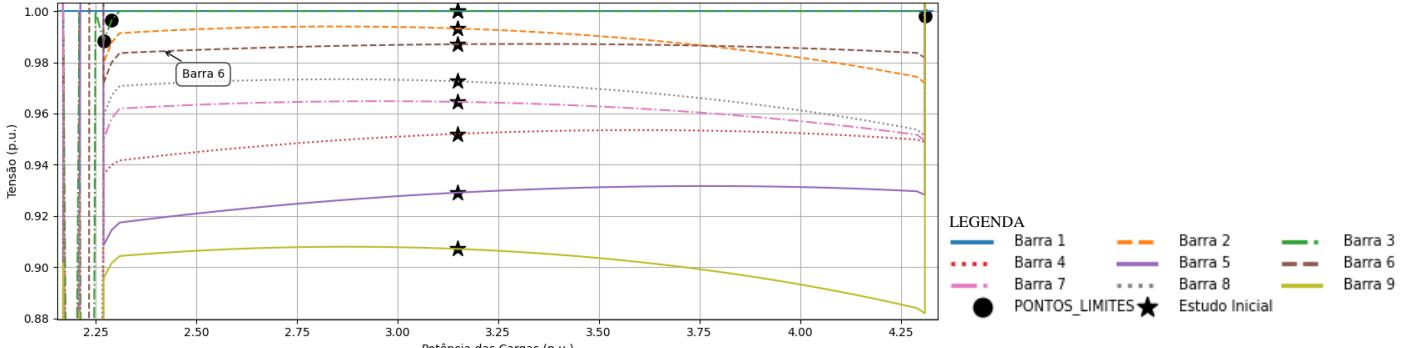
Fonte: autoria própria.

Figura 77: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9: teste T31



Fonte: autoria própria.

Figura 78: GoCurvs - Curva PV para IEEE 9: teste T32



Fonte: autoria própria.

A elevação das potências ativas de geração em diferentes barras do sistema mostra-se, inicialmente, eficaz na atenuação das quedas de tensão, evidenciando uma melhora no perfil de tensões. No entanto, tal benefício se limita a um intervalo operacional; ultrapassado esse limiar, ocorrem instabilidades crescentes, culminando em quedas abruptas de tensão e colapsos de tensão iminentes. Além disso, é possível identificar um comportamento relativamente simétrico nas curvas de resposta para os regimes de carga leve e pesada. Diante desse cenário, este trabalho restringe sua investigação aos fenômenos de colapso associados ao regime de carga pesada, por representarem maior criticidade sistêmica.

A Tabela 45 apresenta um resumo das barras mais impactadas em termos das maiores quedas de tensão registradas, bem como a ordem de alteração conforme o percentual máximo desejado de carga, no regime de carga pesada - correspondente ao lado direito da curva PV obtida a partir do estudo inicial. Como o sistema possui uma

capacidade limitada para adição de carga nem todas as barras da tabela tiveram suas potências efetivamente alteradas sendo a tabela apenas a lista guia.

A análise do impacto nas quedas de tensão para o regime leve - isto é, aquele em que se realiza a subtração do percentual máximo de carga - apresentou resultados bastante semelhantes aos obtidos no regime de carga pesada, resultando em uma listagem praticamente idêntica das barras candidatas à alteração. Diante disso, a apresentação da ordem de decréscimo de cargas (relativa ao lado esquerdo da curva PV) será omitida nesta seção, podendo ser consultada diretamente no terminal de simulação da interface **GoCurvs**.

As figuras Figura 74 a Figura 78 indicam que alterações nas potências ativas de carga e de geração também produzem efeitos significativos sobre os níveis de tensão nas barras do sistema. À medida que se modificam as potências de carga do sistema inicial, observam-se variações nas tensões das barras, resultando em diferentes impactos e, consequentemente, em distintas curvas PV – como era de se esperar ao selecionar diferentes barras para alteração. As quedas de tensão ficam mais expressivas como pode ser também constado pela Tabela 45. Já a modificação das potências ativas de geração das unidades geradoras exerce um efeito direto sobre as tensões do sistema como um todo, promovendo quedas ou elevações generalizadas nos níveis de tensão e alterando, de forma expressiva, a margem de estabilidade de tensão – mas de reduzindo os impactos sobre o erro da queda de tensão.

Tabela 45: GoCurvs – Maiores Quedas de Tensões Detectadas - IEEE 9 Barras

	1º Barra	2º Barra	3º Barra	FIGURA
BARRAS DE MAIOR IMPACTO	5	7	9	Figura 70
MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	0.00046	0.00031	0.00022	Figura 71
BARRAS DE MAIOR IMPACTO	5	7	9	Figura 72
MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	0.00035	0.00029	0.00017	Figura 73
BARRAS DE MAIOR IMPACTO	5	9	7	Figura 74
MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	0.00049	0.00043	0.0004	
BARRAS DE MAIOR IMPACTO	9	5	7	Figura 75
MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	0.00084	0.00062	0.00047	
BARRAS DE MAIOR IMPACTO	5	9	7	Figura 76
MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	0.00027	0.0002	0.00008	
BARRAS DE MAIOR IMPACTO	5	9	7	Figura 77
MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	0.00020	0.00015	0.00002	
BARRAS DE MAIOR IMPACTO	9	5	-	Figura 78
MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	0.00013	0.00004	-	

Fonte: autoria própria.

6.3.3 Resultados do GoCurvs - IEEE 14 Barras

A Tabela 46 apresenta as características gerais que foram consideradas ao longo de todos os eventos simulados no estudo com o sistema IEEE de 9 barras. Por sua vez, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** descreve as alterações realizadas com o objetivo de gerar diferentes combinações de curvas PV, representadas nas Figuras Figura 81 a Figura 90, que servirão de base para análises comparativas.

As curvas PV iniciais foram obtidas por meio de variações progressivas (aumento e redução) da carga ativa nas barras de maior impacto elétrico, segundo a estratégia denominada “MAIORES”. As alterações foram conduzidas até o limite máximo de 100% de variação em relação aos valores de carga definidos originalmente no arquivo CDF do sistema IEEE 14 Barras (vide Apêndice A). As Figura 79 e Figura 80 ilustram, respectivamente, as curvas PV para todas as barras do sistema e para o subconjunto das chamadas “barras críticas” — aquelas cujas unidades geradoras de potência reativa operam próximas de seus limites técnicos.

Observa-se que, ao atingir o limite de fornecimento de reativo nessas barras críticas, o sistema perde a capacidade de controle de tensão, culminando em colapso após atingir 5,98 pu de potência ativa total. Considerando que o ponto de partida da simulação apresentava uma potência ativa de 2,59 pu, infere-se que, sob essas condições de carregamento, o sistema dispõe de uma margem de estabilidade de tensão da ordem de 2,41 pu.

Tabela 46: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 14 – Características Gerais

<i>INVERTER TAP</i>	Sim
<i>GIRAR TRAFO</i>	Não
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,0001
<i>S BASE (MVA)</i>	100
<i>LIMITE LEVE</i>	100
<i>LIMITE PESADO</i>	100
<i>LIMITE GERAL</i>	100
<i>TIPO DO REGIME</i>	ambos
<i>PASSO DE VARIAÇÃO (pu)</i>	0,02
<i>MODELO DE LINHA</i>	PI
<i>ESTRATÉGIA</i>	Maiores
<i>BARRAS ESCOLHIDAS</i>	-
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	0
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	-

Fonte: autoria própria.

Tabela 47: GoCurvs - Estufo com o sistema IEEE 14 – Características alteradas

FIGURAS	ARQUIVO CDF	AVALIAR LIM. DE REATIVO	DESABILITAR CS	OBSERVAÇÃO
Figura 79 Figura 80	ieee14.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 2,59pu$ $P_{colapso}: 5,10pu$ $P_{margem}: 2,41pu$
Figura 81	ieee14_T10.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Maiores limites de geração de reativo nas barras 2, 3, 6 e 8: - Barra 2: original = [-40,50] MVar, novo = [-100,400] MVar - Barra 3: original = [0,50] MVar, novo = [-100,100] MVar - Barra 6: original = [-6,24] MVar, novo = [-50,50] MVar - Barra 8: original = [-6,24] MVar, novo = [-50,50] MVar
Figura 82	ieee14.cdf	Não	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original.
Figura 83	ieee14.cdf	Sim	Sim	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 2,59pu$ $P_{colapso}: 3,86pu$ $P_{margem}: 1,16pu$
Figura 84	ieee14_T20.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de potência ativa de carga das barras 3, 6, 9 e 14: - Barra 3: original = 94,20MW, novo = 150,20MW - Barra 6: original = 11,20MW, novo = 20,20MW - Barra 9: original = 29,50MW, novo = 20,50MW - Barra 14: original = 14,90MW, novo = 10,90MW • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 3,11pu$ $P_{colapso}: 4,52pu$ $P_{margem}: 1,31pu$
Figura 85	ieee14_T21.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de potência ativa de carga das barras 3, 6, 9 e 14: - Barra 3: original = 94,20MW, novo = 160,20MW - Barra 6: original = 11,20MW, novo = 50,20MW - Barra 9: original = 29,50MW, novo = 50,50MW - Barra 14: original = 14,90MW, novo = 30,90MW • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 4,01pu$ $P_{colapso}: 4,40pu$ $P_{margem}: 0,29pu$
Figura 86	ieee14_T30.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de potência ativa de geração da barra 2. - Barra 2: original = 40MW, novo = 300MW
Figura 87	ieee14_T31.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de potência ativa de geração da barra 2 e 3. - Barra 2: original = 40MW, novo = 500MW
Figura 88	ieee14_T32.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de potência ativa de geração da barra 2 e 3. - Barra 2: original = 40MW, novo = 1200MW
Figura 89	ieee14_T33.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de potência ativa de geração da barra 2 e 3. - Barra 2: original = 40MW, novo = 1600MW
Figura 90	ieee14_T34.cdf	Sim	Não	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de potência ativa de geração da barra 2 e 3. - Barra 2: original = 40MW, novo = 1700MW • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 2,59pu$ $P_{colapso}: 4,01pu$ $P_{margem}: 1,33pu$

Fonte: autoria própria.

Figura 79: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14 Barras: todas as barras

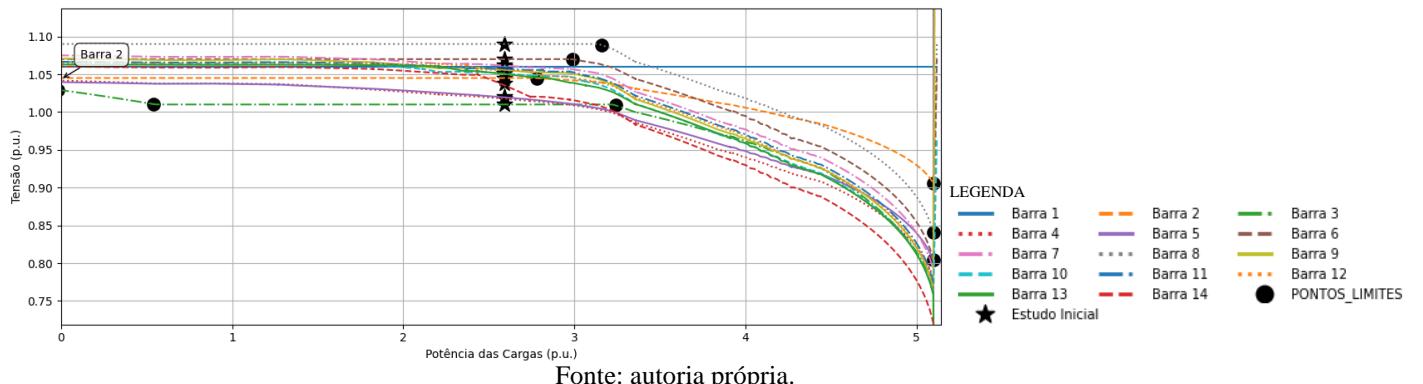
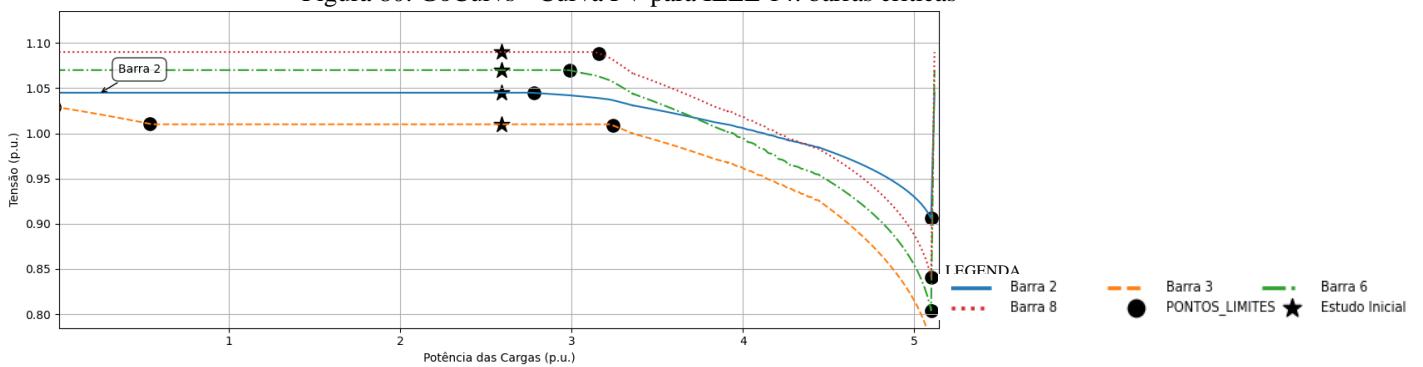


Figura 80: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: barras críticas



As duas figuras a seguir (Figura 81 e Figura 82) apresentam as curvas PV tracejadas para todas as barras do sistema ieee14 barras onde na Figura 81 foi realizada uma ampliação dos limites de geração de potência reativa das unidades geradoras identificadas como críticas (teste T10), já a Figura 82 não foi permitida a avaliação de limite de injeção de potência reativa (teste T11). Nota-se que estas duas abordagens produzem os mesmos impactos sobre o perfil de tensão contribuindo diretamente para o aumento da margem de estabilidade de tensão além de menores quedas de tensão.

Figura 81: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T10

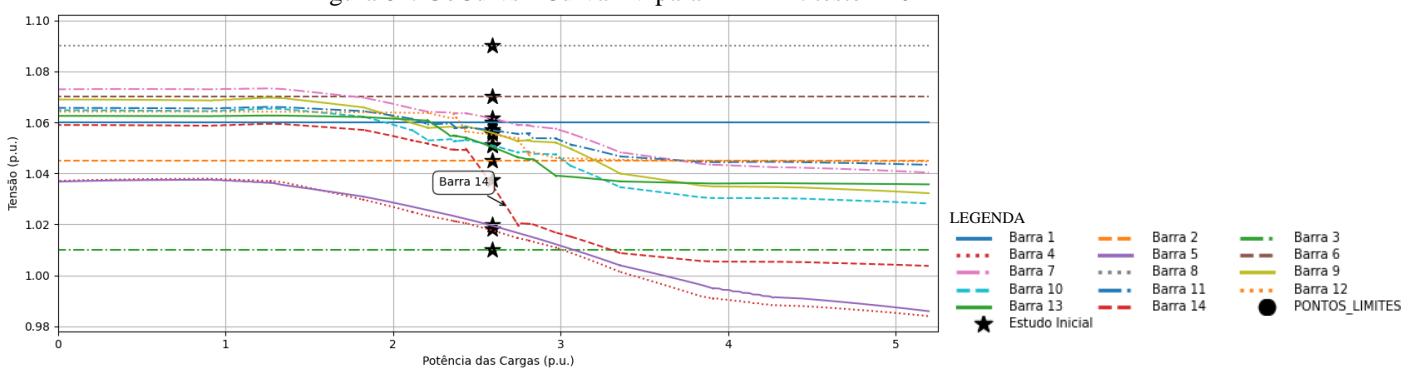
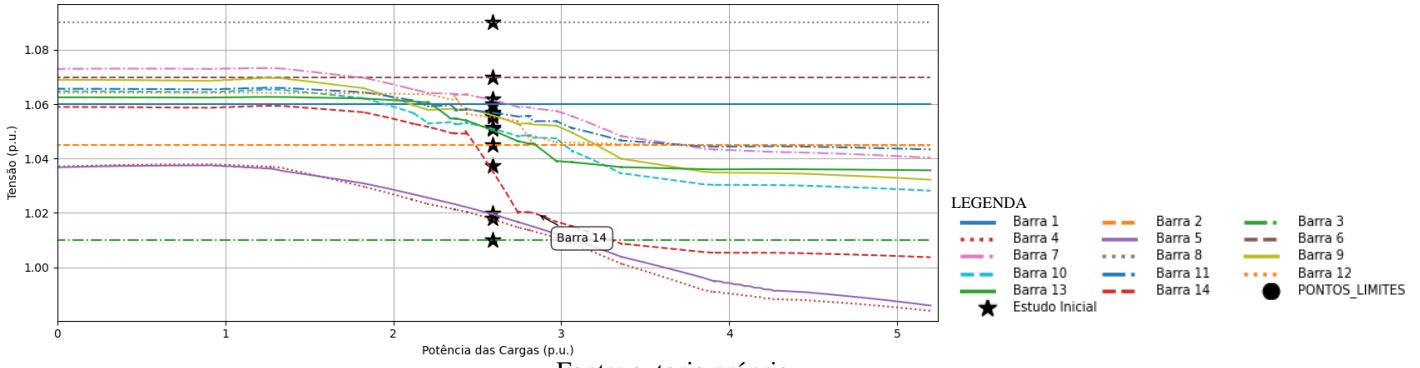
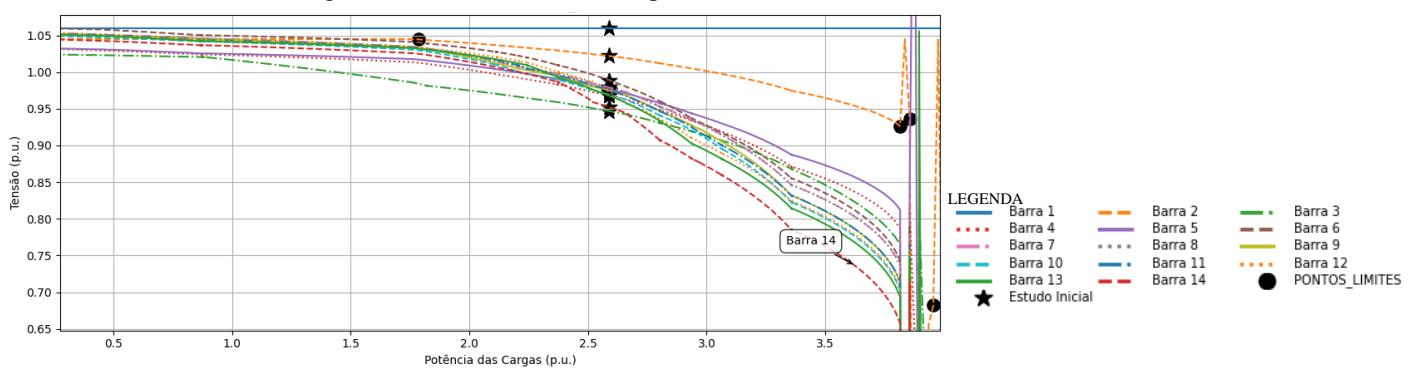


Figura 82: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T11



Desligar as unidades geradoras de potência reativa como os compensadores síncronos, por outro lado possui o efeito inverso ao concluído com as figuras anteriores, ou seja, tende a aumentar as quedas de tensões das barras e reduzir a margem de estabilidade da tensão. A Figura 83 representa o estudo desligando inicialmente os compensadores síncronos das barras 3 e 6 e 8. Ao tomar esta ação, as tensões destas barras que na Figura 79 e Figura 80 estavam controladas agora, desde o início dos cálculos, são consideradas apenas como barras de carga e portanto tem sua tensão calculada no processo iterativo de Newton. Nesta configuração de sistema, a barra pode ser avaliada na lista de maiores barras por inicialmente ela ser PQ e ela é a 7º barra que possui um grande impacto sobre a tensão (Tabela 48).

Figura 83: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T12



Os testes T20 e T21 foram realizados com base no arquivo CDF original, avaliando os limites de potência reativa definidos inicialmente, conforme as configurações descritas nas Tabela 46 e **Erro! Fonte de referência não**

encontrada. Tabela 44. A única diferença entre esses testes está nas potências ativas de carga adotadas no início do estudo. As Figura 84 e Figura 85 apresentam as curvas PV de todas as barras, considerando o sistema IEEE de 14 barras com aumento inicial da potência ativa nas barras 3, 6, 9 e 14.

Os testes finais, T30, T31, T32, T33 e T34 também foram conduzidos com base no arquivo CDF original, mantendo os limites de potência reativa inalterados, e utilizando as mesmas configurações das Tabela 46 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A diferença está nas potências ativas de geração das demais unidades geradoras do sistema. Na prática, essa alteração tem o efeito de "aliviar" a barra swing, redistribuindo o suprimento das cargas e das perdas nos equipamentos de transmissão no cálculo do fluxo de potência como. Como consequência, essa estratégia também influencia diretamente as quedas de tensão observadas nas curvas PV.

Figura 84: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T20

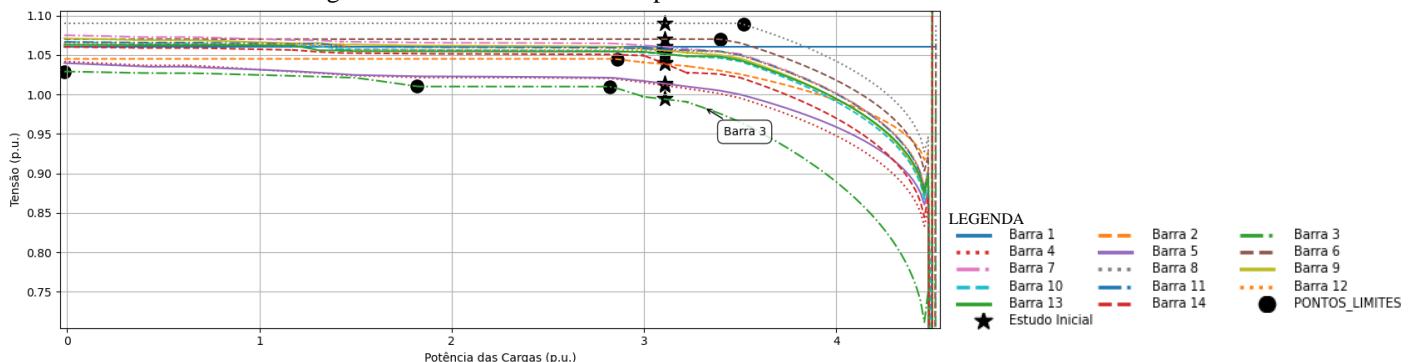


Figura 85: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T21

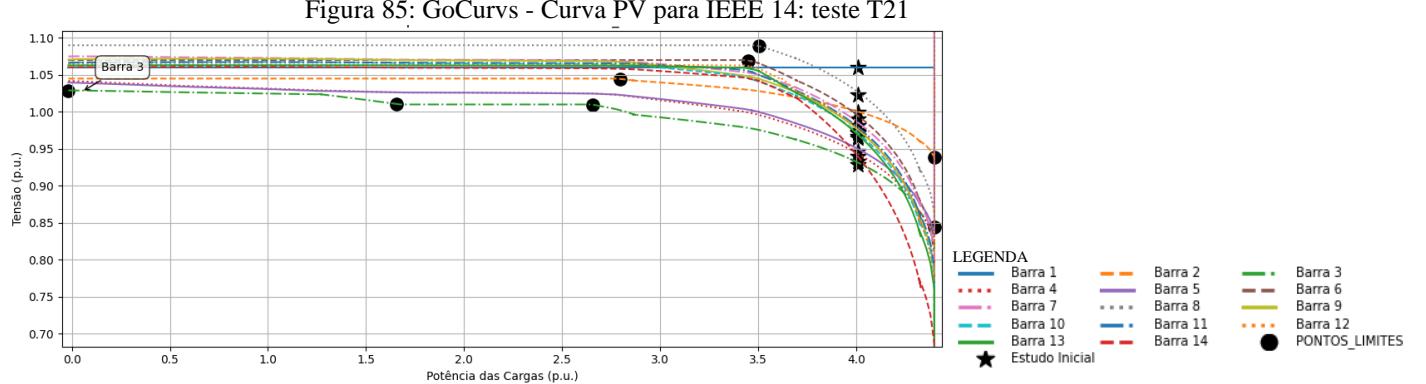
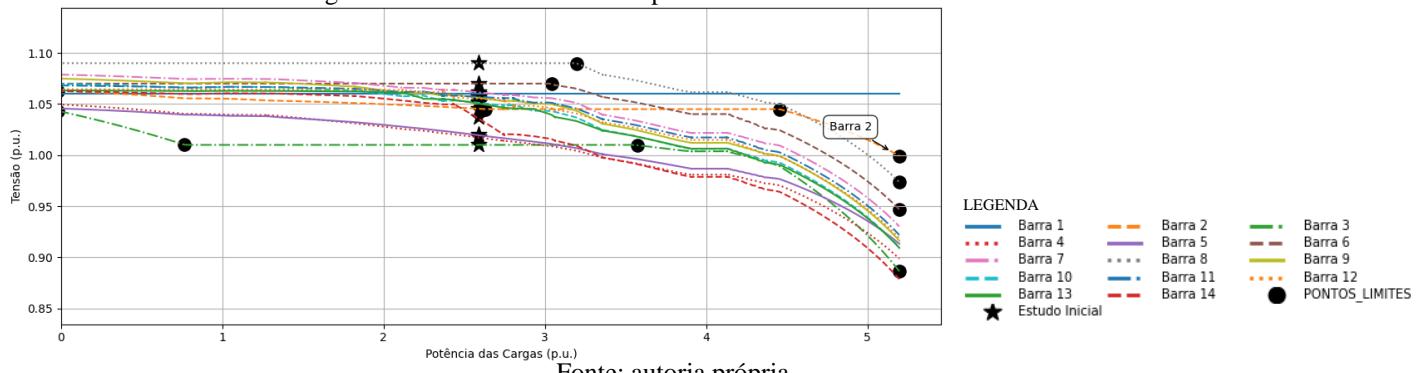
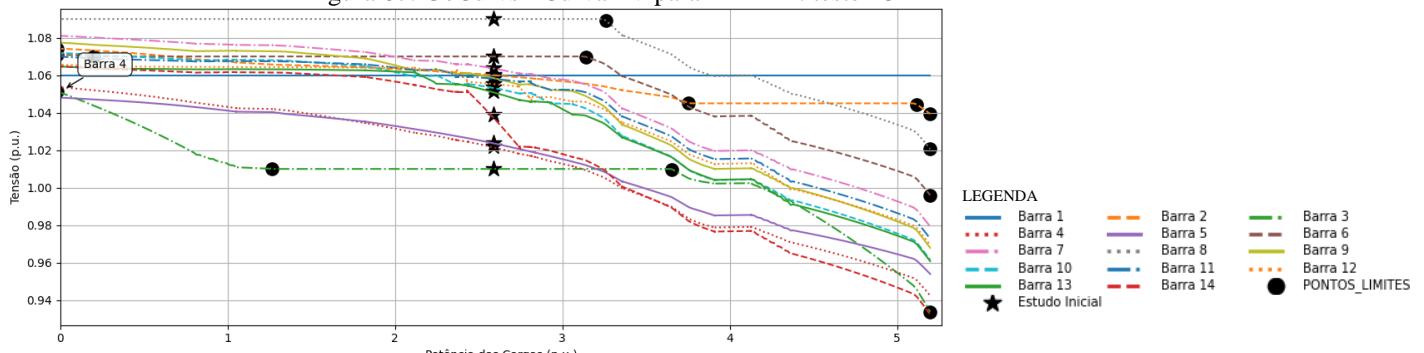


Figura 86: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T31



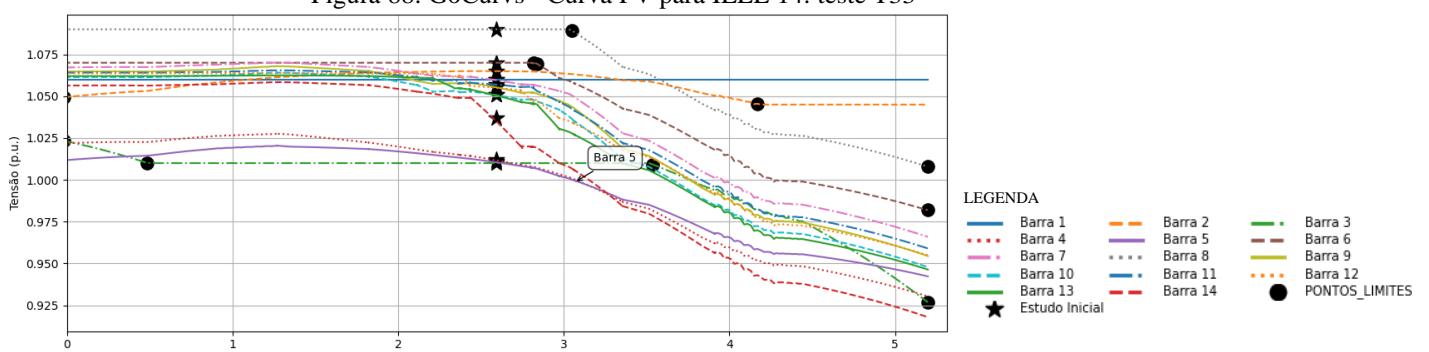
Fonte: autoria própria.

Figura 87: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T32



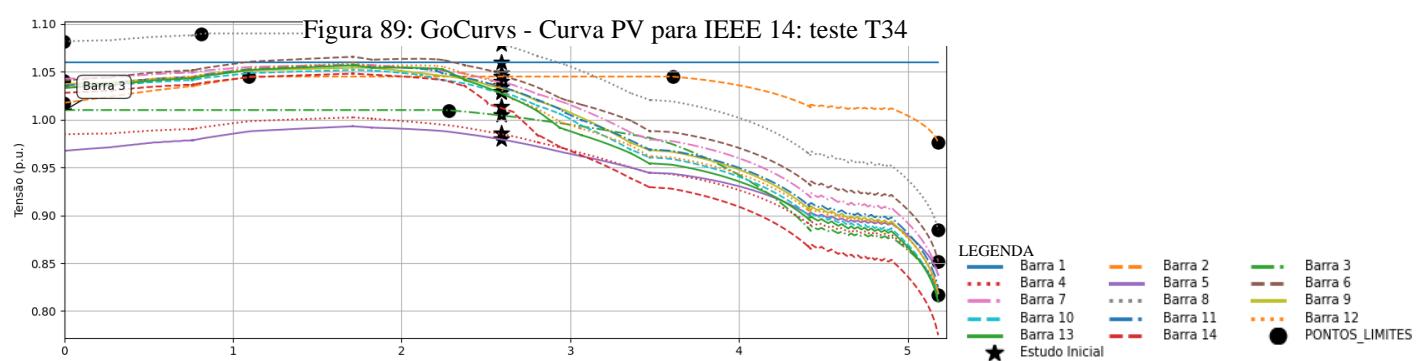
Fonte: autoria própria.

Figura 88: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T33

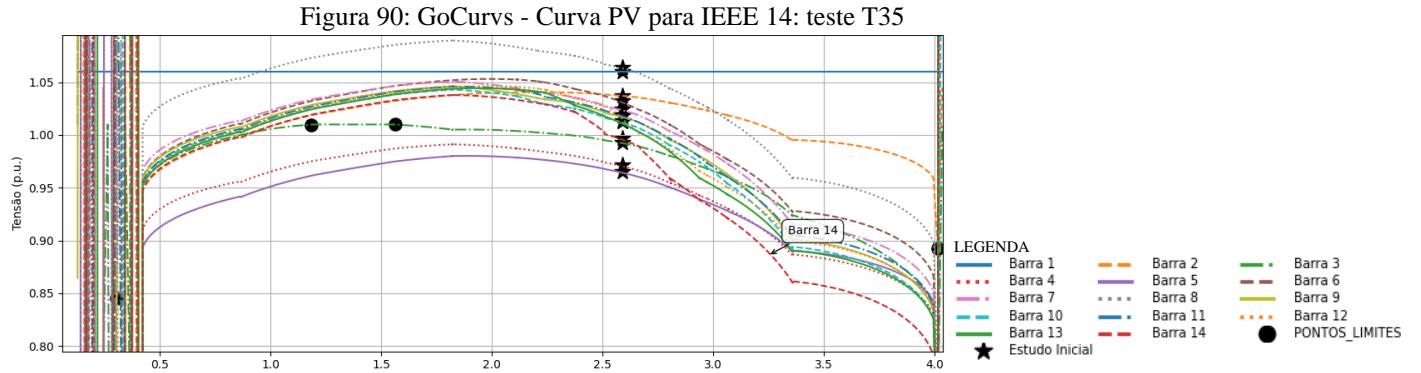


Fonte: autoria própria.

Figura 89: GoCurvs - Curva PV para IEEE 14: teste T34



Fonte: autoria própria.



Fonte: autoria própria.

A Tabela 48 apresenta um resumo das barras mais impactadas em termos das maiores quedas de tensão registradas, bem como a ordem de alteração conforme o percentual máximo desejado de carga, no regime de carga pesada - correspondente ao lado direito da curva PV obtida a partir do estudo inicial. Como o sistema possui uma capacidade limitada para adição de carga nem todas as barras da tabela tiveram suas potências efetivamente alteradas sendo a tabela apenas a lista guia.

A análise do impacto nas quedas de tensão para o regime leve - isto é, aquele em que se realiza a subtração do percentual máximo de carga - apresentou resultados bastante semelhantes aos obtidos no regime de carga pesada, resultando em uma listagem praticamente idêntica das barras candidatas à alteração. Diante disso, a apresentação da ordem de decréscimo de cargas (relativa ao lado esquerdo da curva PV) será omitida nesta seção, podendo ser consultada diretamente no terminal de simulação da interface **GoCurvs**.

Adicionalmente, para a formação completa dos pontos da curva no regime leve, especialmente no caso do sistema IEEE 14 barras, foi necessário considerar também as potências de carga das barras do tipo PV. Embora essas barras não sejam incluídas na listagem inicial de maiores impactos, sua inclusão foi essencial para a obtenção dos pontos próximos à origem da curva, exceto nos casos em que tais barras não apresentem condição PV no estado inicial do sistema.

Tabela 48: GoCurvs – Maiores Quedas de Tensões Detectadas - IEEE 14 Barras

	1º Barra	2º Barra	3º Barra	4º Barra	5º Barra	6º Barra	7º Barra	8º Barra	9º Barra	FIGURA
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	14 0.00193	12 0.00177	11 0.00107	13 0.00092	10 0.00092	9 0.00054	4 0.00033	5 0.00033	- -	Figura 79 Figura 80
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	14 0.00193	12 0.00177	11 0.00107	13 0.00092	10 0.00092	9 0.00054	4 0.00033	5 0.00033	- -	Figura 81 Figura 82
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	12 0.00432	14 0.00430	13 0.00333	11 0.00306	10 0.00276	9 0.00224	3 0.00182	- -	- -	Figura 83
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	14 0.00197	12 0.00178	3 0.0016	11 0.00113	10 0.00102	13 0.00094	4 0.00073	5 0.00056	2 0.00036	Figura 84
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	14 0.00663	12 0.00596	13 0.00505	11 0.00453	10 0.00419	9 0.00364	3 0.00279	- -	- -	Figura 85
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	14 0.00195	12 0.00177	11 0.00109	10 0.00095	13 0.00093	9 0.00057	4 0.00039	5 0.00037	2 0.00018	Figura 86
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	14 0.00195	12 0.00177	11 0.00108	10 0.00094	13 0.00093	9 0.00056	4 0.00036	5 0.00034	2 0.00012	Figura 87
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	14 0.00194	12 0.00177	11 0.00108	13 0.00093	10 0.00092	9 0.00053	4 0.00028	5 0.00025	- -	Figura 88
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	12 0.00309	14 0.0029	13 0.00214	11 0.00194	10 0.00161	9 0.00115	6 0.00113	3 0.00088	- -	Figura 89
BARRAS DE MAIOR IMPACTO MAIOR QUEDA DE TENSÃO (ERRO EM PU)	12 0.00356	14 0.00349	13 0.00261	11 0.00235	10 0.00203	9 0.00153	3 0.00075	4 0.00035	- -	Figura 90

Fonte: autoria própria.

6.3.4 Resultados do GoCurvs - IEEE 30 Barras

Considerando a complexidade do sistema IEEE de 30 barras e a grande quantidade de combinações possíveis entre perfis de carga e geração, este trabalho optou por restringir-se aos experimentos sintetizados na Tabela 50, cujas configurações gerais foram padronizadas conforme apresentado na Tabela 49.

As primeiras curvas PV geradas basearam-se na estratégia denominada “MAIORES”, a qual consiste na aplicação de acréscimos e decréscimos progressivos da carga ativa nas barras com maior impacto elétrico, até o limite de 100% de variação em relação à carga original do sistema, conforme definida pelo arquivo CDF de referência (Apêndice A). As Figuras **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 92 resultantes representam as curvas PV tanto para barras do tipo PV quanto para barras do tipo PQ. No entanto, a análise se restringe às chamadas “barras críticas” – aquelas cujas unidades geradoras de potência reativam operam próximas aos seus limites – **Erro!** **Fonte de referência não encontrada..** Observa-se que, ao atingir os limites de fornecimento de reativo nessas barras críticas, o controle de tensão é perdido, e o sistema

entra em colapso após atingir um total de 4,89 pu de potência ativa. Considerando que a soma inicial das potências no início da construção das curvas era de 3,08 pu, pode-se inferir que, para as configurações adotadas, o sistema apresenta uma margem de estabilidade de tensão da ordem de 1,71 pu.

Tabela 49: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 30 – Características Gerais

<i>INVERTER TAP</i>	Sim
<i>GIRAR TRAFO</i>	Não
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,0001
<i>S BASE (MVA)</i>	100
<i>LIMITE LEVE</i>	100
<i>LIMITE PESADO</i>	100
<i>LIMITE GERAL</i>	-
<i>TIPO DO REGIME</i>	ambos
<i>PASSO DE VARIAÇÃO (pu)</i>	0,02
<i>MODELO DE LINHA</i>	PI
<i>BARRAS ESCOLHIDAS</i>	-
<i>LÓGICA SUPLEMENTAR</i>	0
<i>COMUTAÇÃO MÁXIMA</i>	-

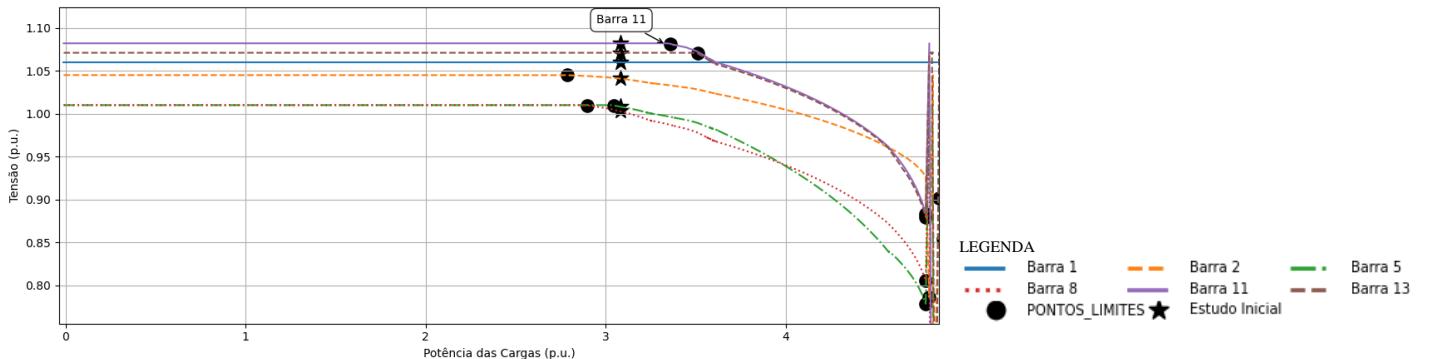
Fonte: autoria própria.

Tabela 50: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 30 – Características alteradas

<i>FIGURAS</i>	<i>ARQUIVO CDF</i>	<i>AVALIAR LIM. DE REATIVO</i>	<i>DESABILITAR CS</i>	<i>ESTRATÉGIA</i>	<i>OBSERVAÇÃO</i>
Erro! Fonte de referência não encontrad a. Figura 92 Erro! Fonte de referência não encontrad a.	ieee30.cdf	Sim	Não	Maiores	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Colapso de tensão detectado: $P_{inicial}: 3,08\text{pu}$ $P_{colapso}: 4,89\text{pu}$ $P_{margem}: 1,71\text{pu}$
Figura 94 Figura 95	ieee30.cdf	Não	Não	Maiores	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original.
Figura 96	ieee30.cdf	Sim	Sim	Maiores	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Colapso de tensão detectado: $P_{inicial}: 3,08\text{pu}$ $P_{colapso}: 3,49\text{pu}$ $P_{margem}: 0,31\text{pu}$
Figura 97	ieee30.cdf	Sim	Não	Escolher	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Escolhido barra de maior impacto com alteração de 1000% no regime pesado. • Colapso de tensão detectado: $P_{inicial}: 3,08\text{pu}$ $P_{colapso}: 3,40\text{pu}$ $P_{margem}: 0,22\text{pu}$

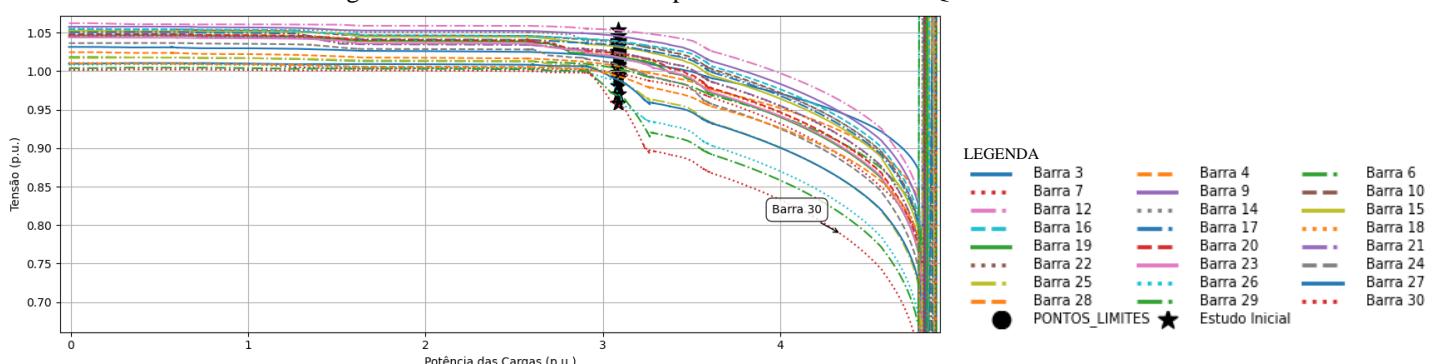
Fonte: autoria própria.

Figura 91: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 – barras PV



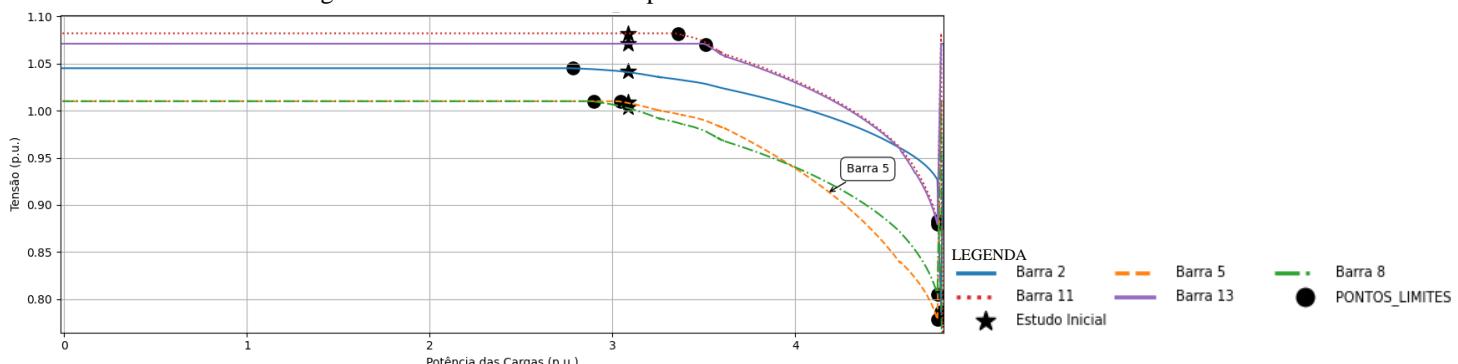
Fonte: autoria própria.

Figura 92: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 – barras PQ



Fonte: autoria própria.

Figura 93: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 – barras criticas

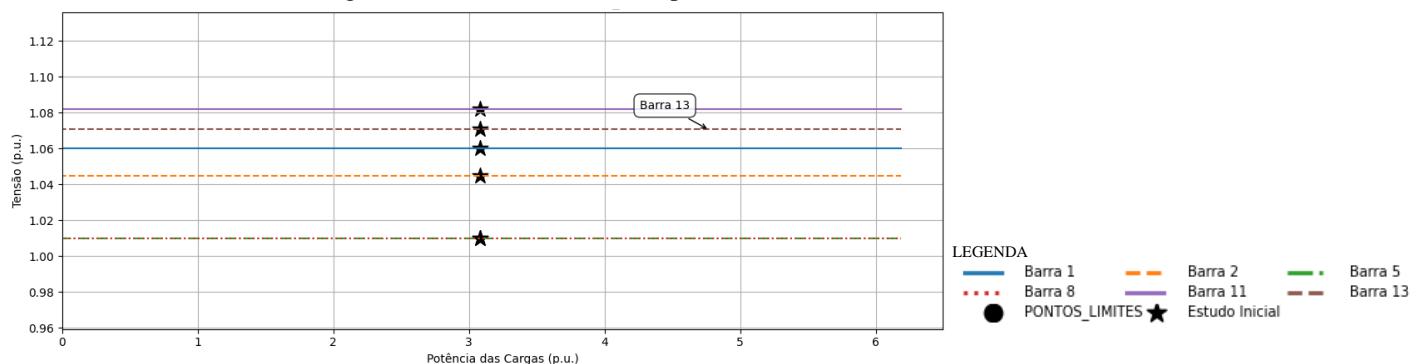


Fonte: autoria própria.

As Figura 94 e Figura 95 apresentam as curvas PV, representadas por traços, para as barras dos tipos PV e PQ do sistema IEEE de 30 barras, considerando a hipótese em que não há restrição na injeção de potência reativa. Assim como observado anteriormente para os sistemas IEEE de 9 e 14 barras, verifica-se uma melhora significativa nas margens de estabilidade de tensão, bem como uma atenuação nos perfis

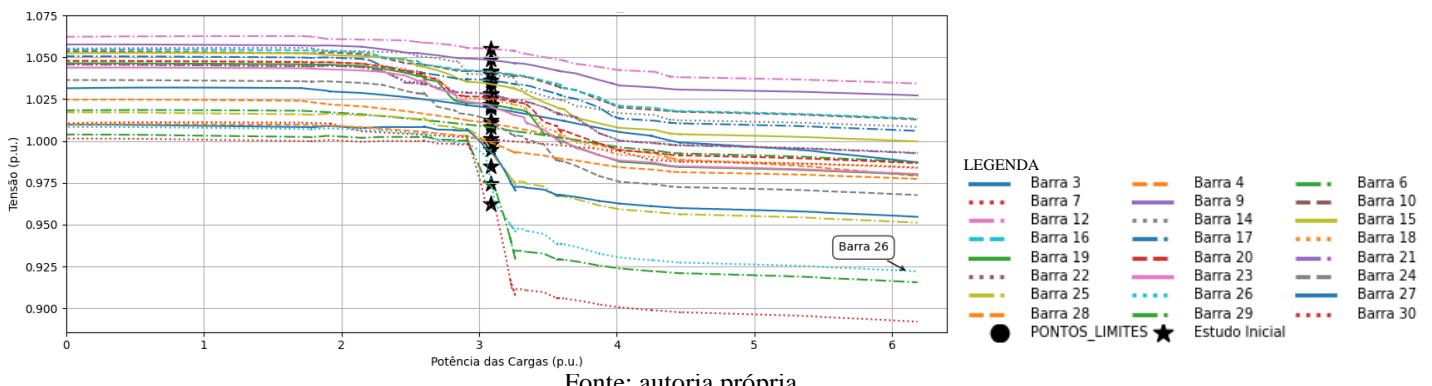
de queda de tensão, desde que haja injeção reativa suficiente para sustentar os níveis de tensão no sistema.

Figura 94: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 – barras PV



Fonte: autoria própria.

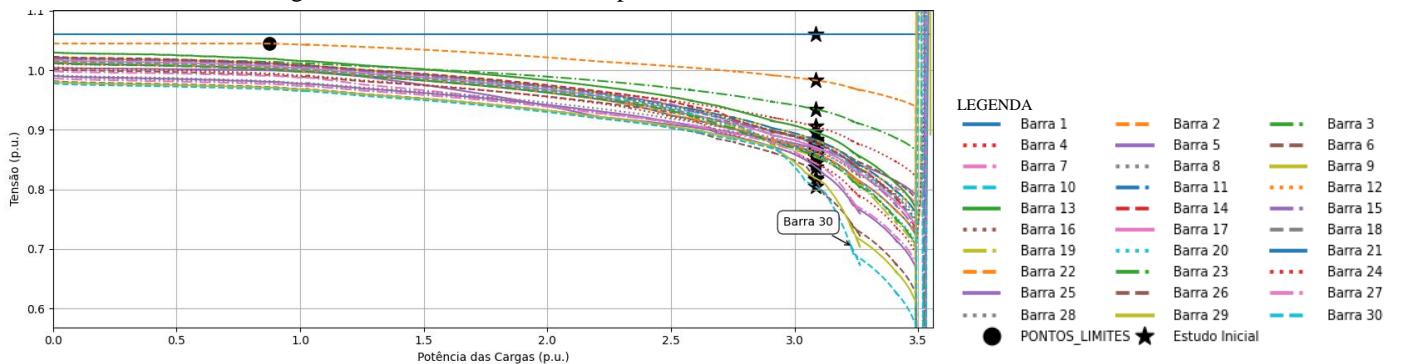
Figura 95: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 – barras PQ



Fonte: autoria própria.

Por outro lado, a redução da quantidade de barras sob controle de tensão – por exemplo, por meio da desativação de compensadores síncronos – tende a diminuir significativamente as margens de estabilidade de tensão e a intensificar os perfis de queda de tensão no sistema. Tal comportamento pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Figura 96: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 – todas as barras

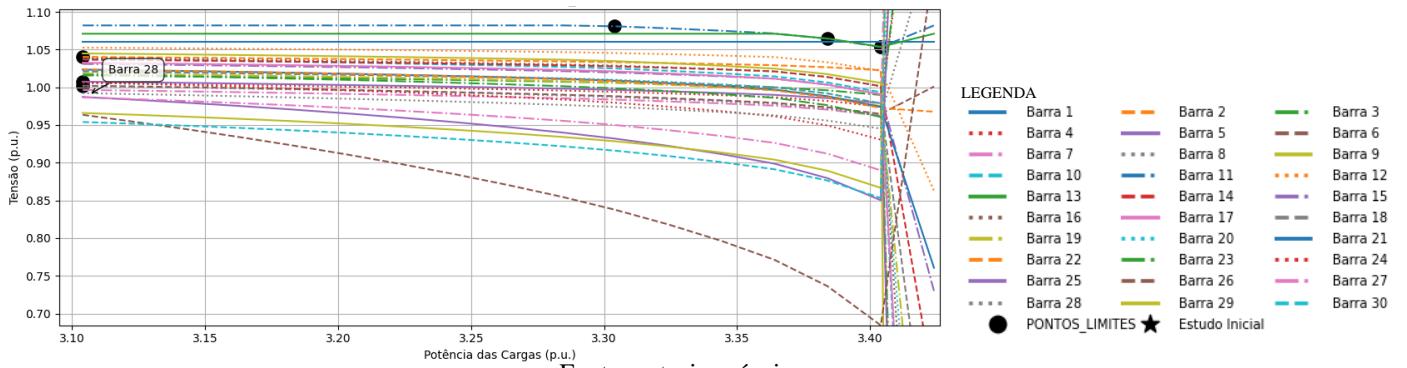


A Tabela 51 é a listagem das barras de maior impacto sob as quedas de tensões que foram utilizadas para os testes. O último cenário proposto foi realizado com variação exclusivamente na barra de maior impacto sobre o perfil de tensão – a barra 26 – até a ocorrência de colapso de tensão, o qual se deu após um aumento de 615% em sua potência ativa. Os resultados demonstraram uma margem de estabilidade de tensão ainda inferior àquela observada no cenário em que os compensadores síncronos não foram considerados, evidenciando a relevância das quedas de tensão na dinâmica do colapso.

Tabela 51: Maiores Quedas de Tensões Detectadas - IEEE 30 Barras

Ordem	Barra	Queda de Tensão (ΔV)	Ordem	Barra	Queda de Tensão (ΔV)
1º	26	0.00908	11º	5	0.00142
2º	30	0.00763	12º	15	0.00137
3º	29	0.00625	13º	21	0.00135
4º	23	0.00243	14º	17	0.00125
5º	19	0.00240	15º	7	0.00113
6º	14	0.00239	16º	8	0.00092
7º	18	0.00238	17º	10	0.00086
8º	24	0.00230	18º	4	0.00069
9º	20	0.00215	19º	3	0.00056
10º	16	0.00142	20º	2	0.00035

Figura 97: GoCurvs - Curva PV para IEEE 30 – todas as barras



Fonte: autoria própria.

6.3.5 Resultados do GoCurvs - IEEE 118 Barras

Considerando a complexidade do sistema IEEE de 118 barras e a grande quantidade de combinações possíveis entre perfis de carga e geração, este trabalho optou por restringir-se aos experimentos sintetizados na Tabela 53, cujas configurações gerais foram padronizadas conforme apresentado na Tabela 52.

As primeiras curvas PV geradas basearam-se na estratégia denominada “MAIORES”, a qual consiste na aplicação de acréscimos e decréscimos progressivos da carga ativa nas barras com maior impacto elétrico, até o limite de 100% de variação em relação à carga original do sistema, conforme definida pelo arquivo CDF de referência (Apêndice A). As Figura 98 Figura 99 resultantes representam as curvas PV tanto para barras do tipo PV quanto para barras do tipo PQ. No entanto, a análise se restringe às chamadas “barras críticas” – aquelas cujas unidades geradoras de potência reativam operam próximas aos seus limites – Figura 100. Observa-se que, ao atingir os limites de fornecimento de reativo nessas barras críticas, o controle de tensão é perdido, e o sistema entra em colapso após atingir um total de 43,23 pu de potência ativa. Considerando que a soma inicial das potências no início da construção das curvas era de 36,68 pu, pode-se inferir que, para as configurações adotadas, o sistema apresenta uma margem de estabilidade de tensão da ordem de 6,45 pu.

Tabela 52: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 118 – Características Gerais

<i>INVERTER TAP</i>	Não
<i>GIRAR TRAFO</i>	Sim
<i>TOLERÂNCIA</i>	0,0001
<i>S BASE (MVA)</i>	100
<i>LIMITE LEVE</i>	100
<i>LIMITE PESADO</i>	100
<i>LIMITE GERAL</i>	-
<i>TIPO DO REGIME</i>	ambos
<i>PASSO DE VARIAÇÃO (pu)</i>	0,02
<i>MODELO DE LINHA</i>	PI

BARRAS ESCOLHIDAS	-
LÓGICA SUPLEMENTAR	0
COMUTAÇÃO MÁXIMA	-

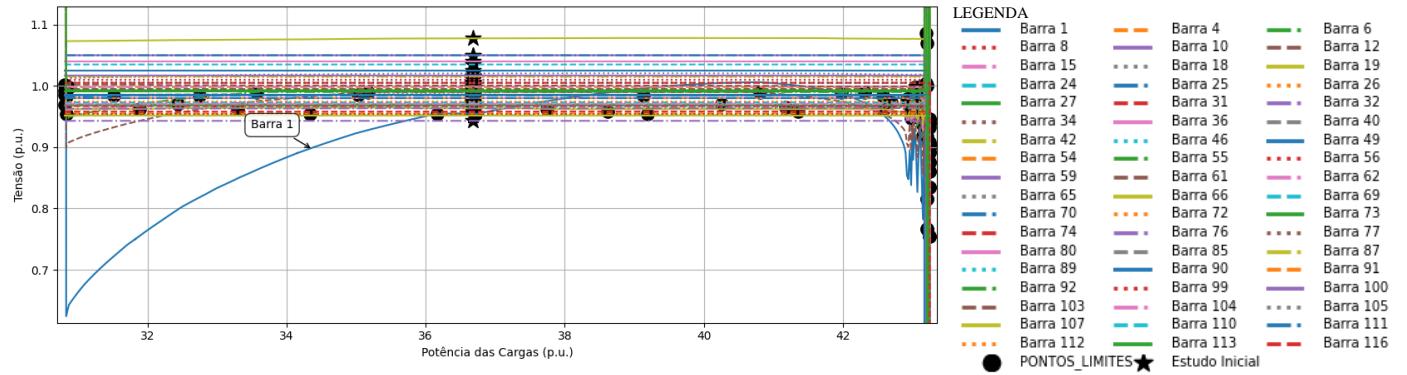
Fonte: autoria própria.

Tabela 53: GoCurvs - Estudo com o sistema IEEE 118 – Características alteradas

FIGURAS	ARQUIVO CDF	AVALIAR LIM. DE REATIVO	DESABILITAR CS	ESTRATÉGIA	OBSERVAÇÃO
Figura 98 Figura 99 Figura 100	ieee118.cdf	Sim	Não	Maiores	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 36,68pu$ $P_{colapso}: 43,23pu$ $P_{margem}: 6,45pu$
Figura 101 Figura 102	ieee118.cdf	Não	Não	Maiores	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 36,68pu$ $P_{colapso}: 45,89pu$ $P_{margem}: 9,11pu$
Figura 103 Figura 104	ieee118.cdf	Sim	Sim	Maiores	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 36,68pu$ $P_{colapso}: 42,45pu$ $P_{margem}: 5,77pu$
Figura 105 Figura 106	ieee118.cdf	Sim	Não	Maiores	<ul style="list-style-type: none"> • Arquivo CDF original. • Escolhido barra de maior impacto com alteração de 1000% no regime pesado. • Colapso de tensão detectado: $P_{initial}: 36,68pu$ $P_{colapso}: 46,20pu$ $P_{margem}: 9,42pu$

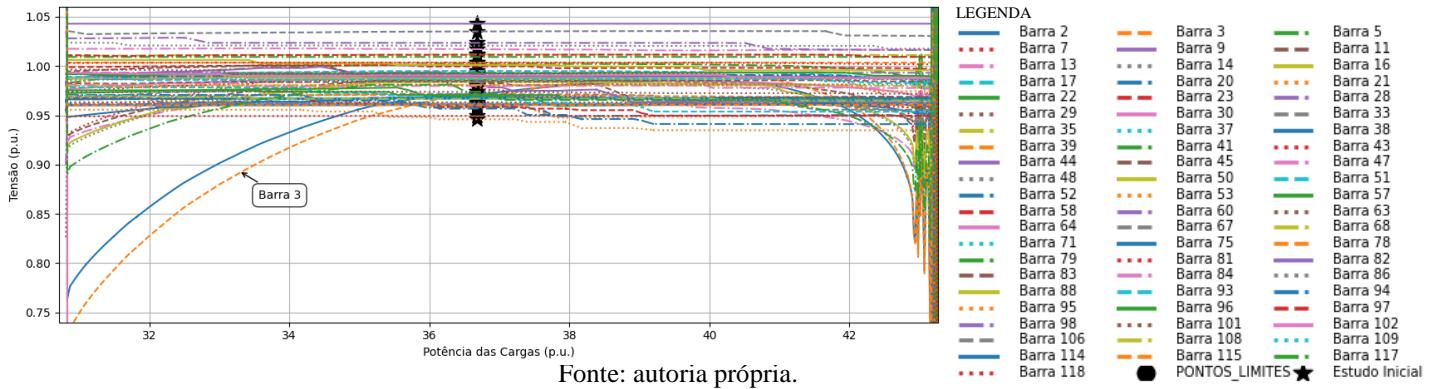
Fonte: autoria própria.

Figura 98: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PV



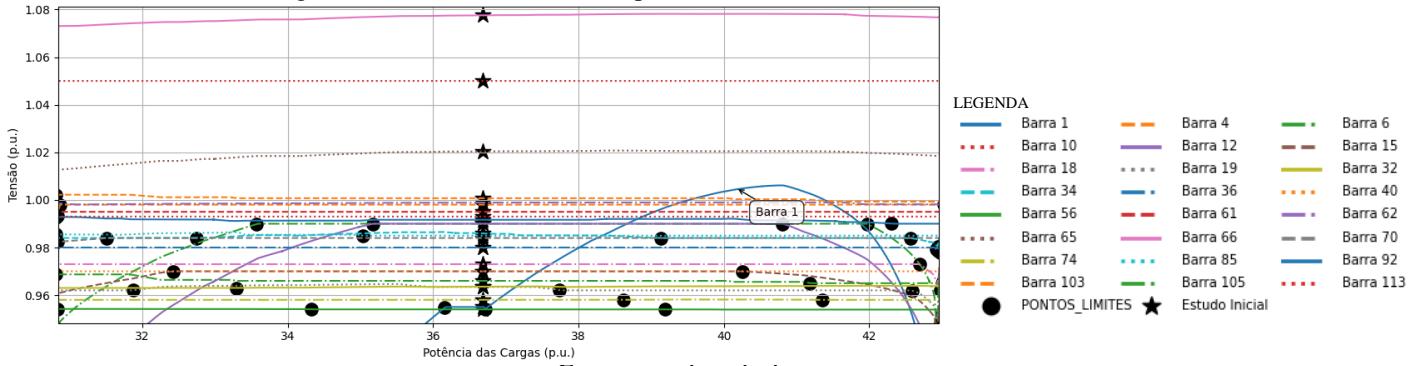
Fonte: autoria própria.

Figura 99: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PQ



Fonte: autoria própria.

Figura 100: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras críticas



Fonte: autoria própria.

As Figura 101 Figura 102 apresentam as curvas PV, representadas por traços, para as barras dos tipos PV e PQ do sistema IEEE de 118 barras, considerando a hipótese em que não há restrição na injeção de potência reativa. Nota-se, neste caso, que houve uma ampliação da margem de estabilidade (ao menos sob o regime pesado) além de melhorar a amplitude das quedas de tensão do sistema. Como as linhas 2 e 3 possuem altíssima amplitude de queda de tensão registrada, acabam colocando todo o sistema as margens do colapso de tensão.

Figura 101: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PV

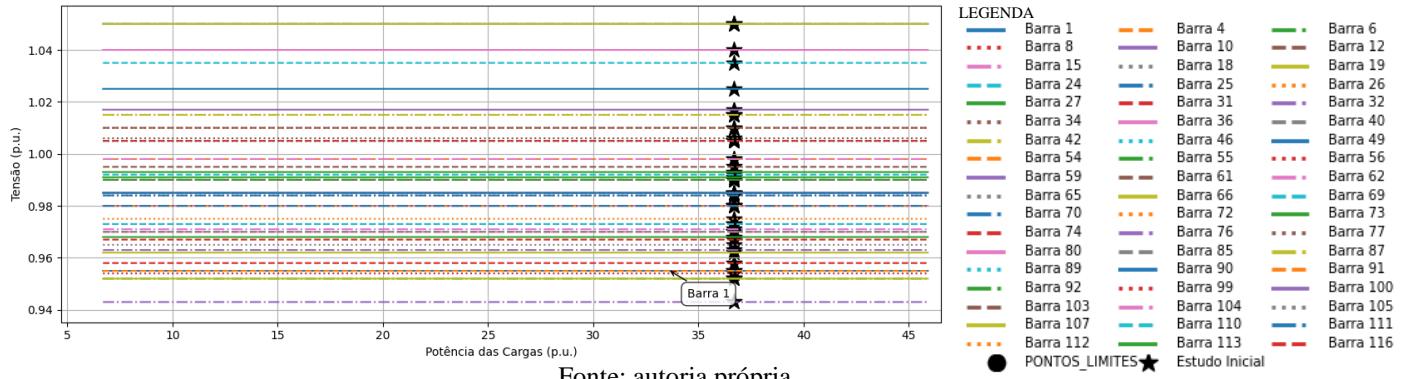
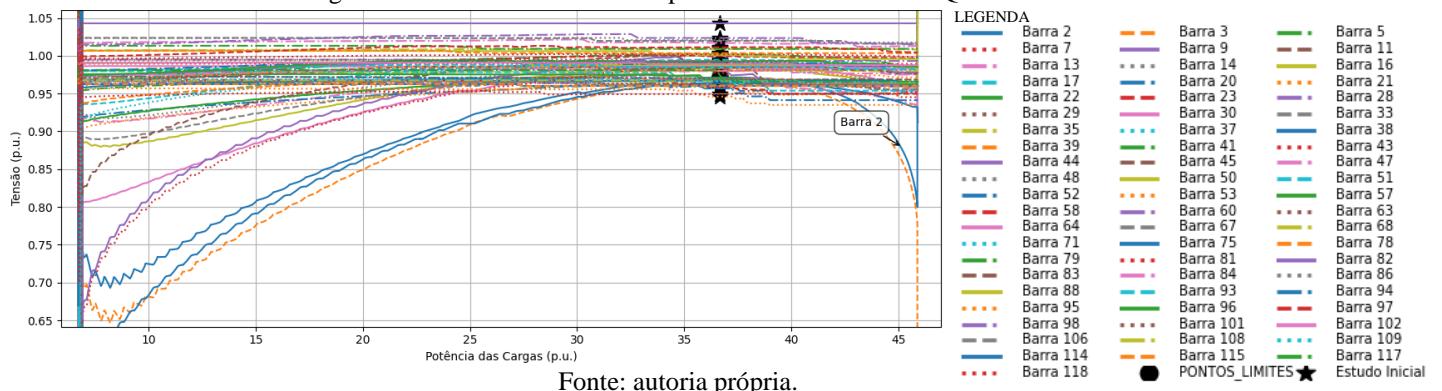


Figura 102: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PQ



Por outro lado, a redução do número de barras sob controle de tensão – por exemplo, mediante a desativação de compensadores síncronos – tende a comprometer significativamente as margens de estabilidade de tensão, além de intensificar os perfis de queda de tensão no sistema, conforme evidenciado nas Figura 103 Figura 104. Observa-se, ainda, que barras localizadas nas proximidades da barra de referência, como as barras 2 e 3, bem como a própria barra de referência, apresentam elevadas amplitudes de queda de tensão, conduzindo o sistema a uma situação de colapso iminente, com uma margem aproximada de 6,45 pu.

Figura 103: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PV

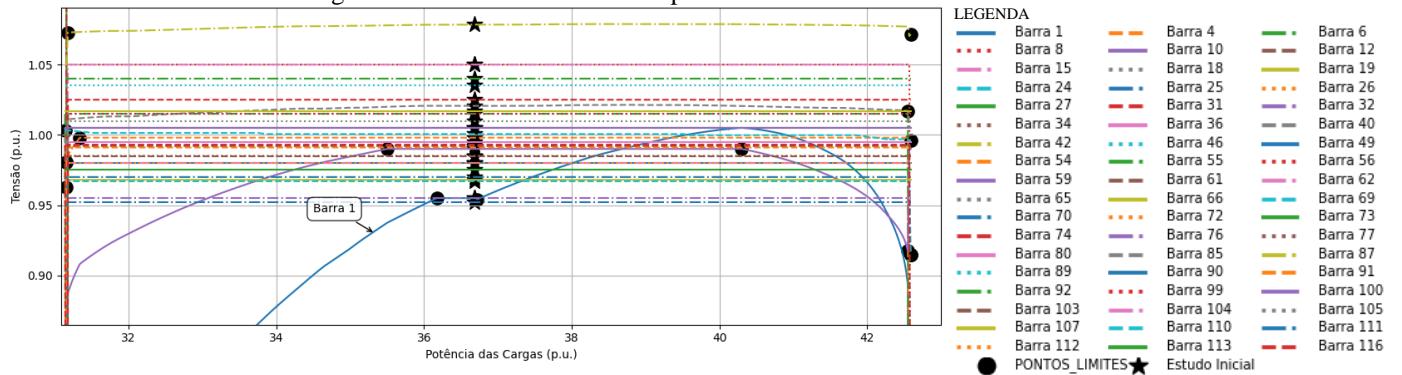
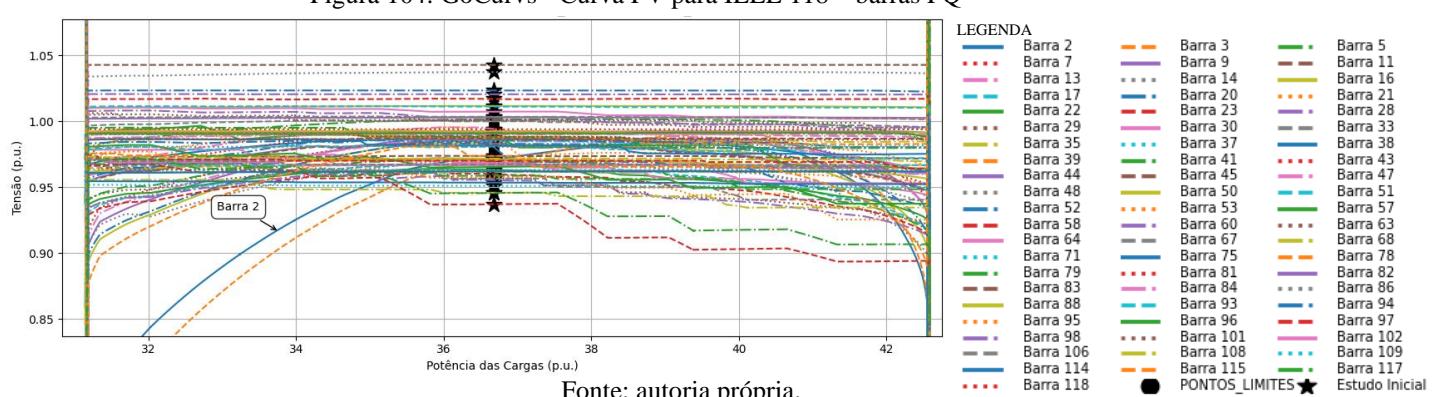


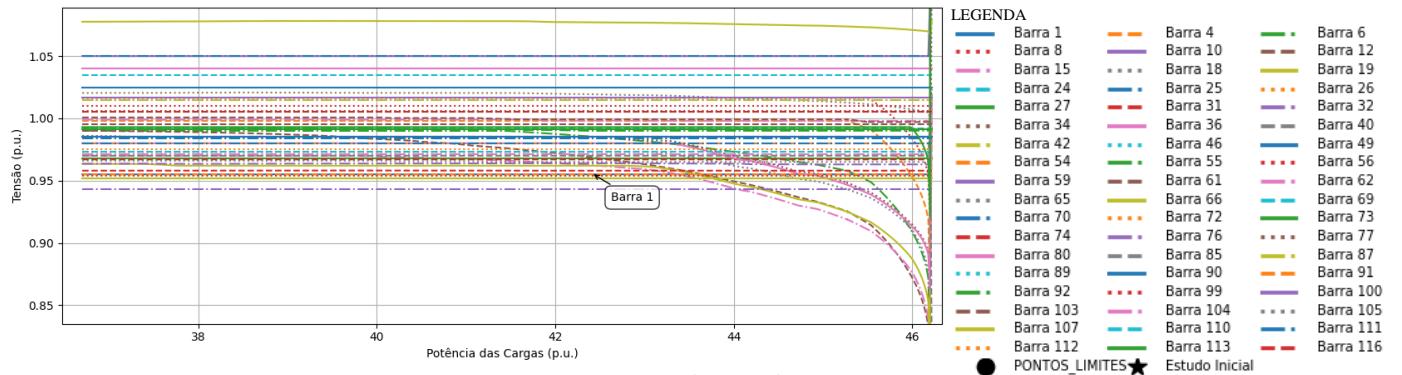
Figura 104: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PQ



Diante dos resultados apresentados até o momento, levanta-se a hipótese de que, a depender do nível de carregamento do sistema – bem como da distribuição das potências geradas – sempre haverá alguma estratégia capaz de conduzir o sistema a uma região mais segura de operação. Em outras palavras, determinadas intervenções podem ampliar a margem de estabilidade de tensão e/ou melhorar os perfis de queda de tensão do sistema.

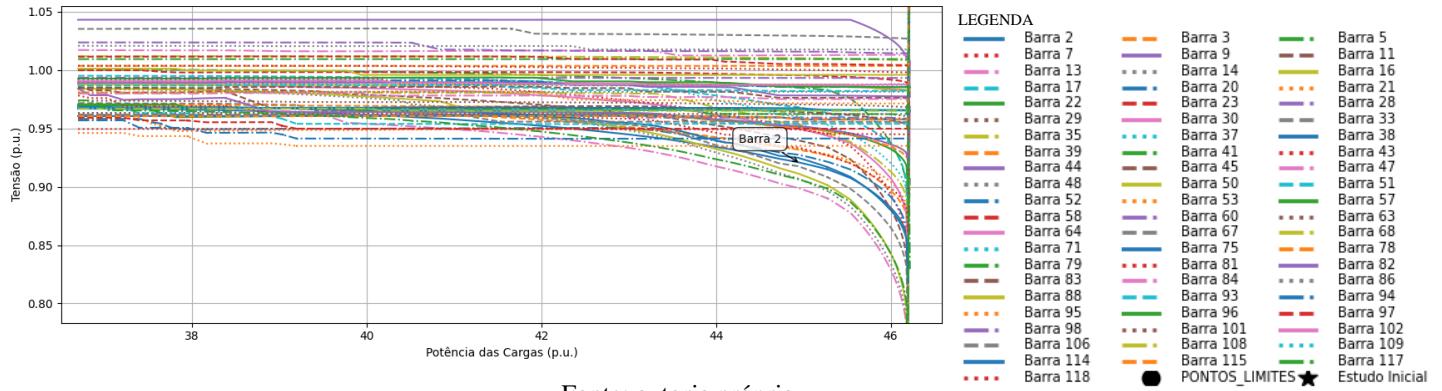
Com o objetivo de testar essa hipótese, foi elaborado um novo cenário no sistema IEEE 118 barras, no qual foram implementadas duas intervenções: (i) ampliação da capacidade de fornecimento de potência reativa da barra 1 e (ii) duplicação de todas as linhas conectadas às barras 1, 2 e 3. Ambas as melhorias foram aplicadas mantendo-se a configuração original de cargas e gerações do arquivo CDF base. Os resultados indicaram que essas modificações proporcionaram a maior margem de estabilidade de tensão registrada, além de uma significativa melhoria nos perfis de tensão, especialmente nas regiões próximas à condição inicial de operação do sistema - Figura 105 Figura 106.

Figura 105: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PV



Fonte: autoria própria.

Figura 106: GoCurvs - Curva PV para IEEE 118 – barras PQ



Fonte: autoria própria.

6.4 Considerações Finais

6.4.1 Divergência numérica

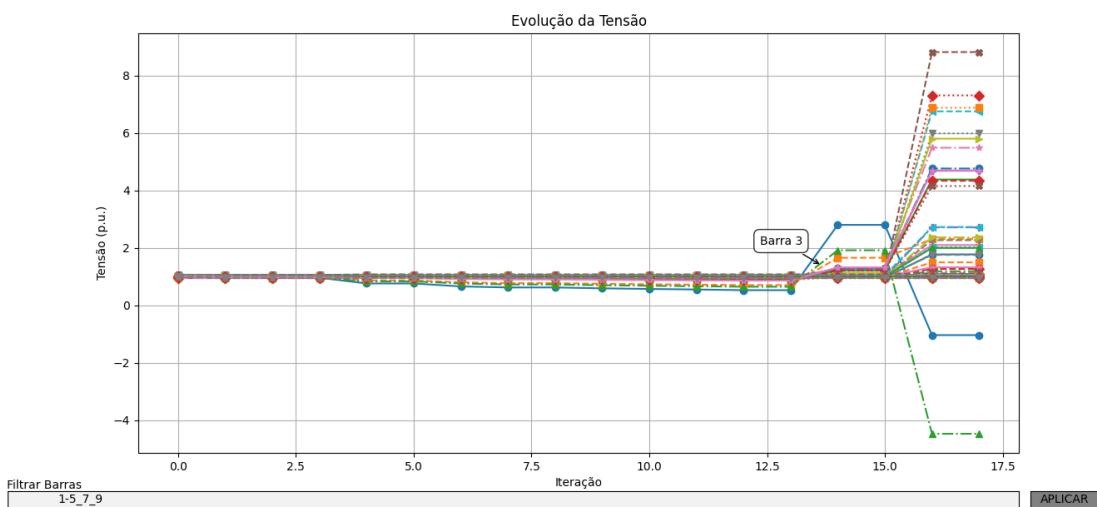
Em sistemas elétricos de potência, a divergência de um cálculo de fluxo de potência ocorre quando o algoritmo não consegue mais encontrar um ponto de equilíbrio para as equações de balanço de potência ativa e reativa. Esse fenômeno está intimamente ligado à margem de estabilidade de tensão e ao risco de colapso de tensão, situações críticas que podem levar a falhas em cascata e apagões. O correto tratamento dessas divergências é fundamental para garantir a confiabilidade das simulações e a segurança operativa do sistema.

O sistema diverge numericamente sempre que se extrapola o limite crítico de queda de tensão ou se extrapola em abertura angular crítica – cenários o qual a queda de tensão ainda não é tão severa, mas há problemas com o realocamento de potência ativa de carga e ou geração. Neste momento deve-se averiguar (i) se o sistema CDF foi escrito

adequadamente para o sistema proposto, (ii) se os níveis de potência ativa ou reativa de geração e carga estão adequados ao sistema proposto.

As principais características do fluxo de potência para problemas desta natureza é a de que apresentam convergência rápida e os parâmetros elétricos claramente tendendo ao infinito. O “nariz” da curva PV nas figuras do item acima representa um limiar a partir do qual qualquer acréscimo na potência de carga o sistema sempre divergirá numericamente.

Figura 107: Exemplo de comportamento das Tensões na Divergência Numérica



Fonte: autoria própria.

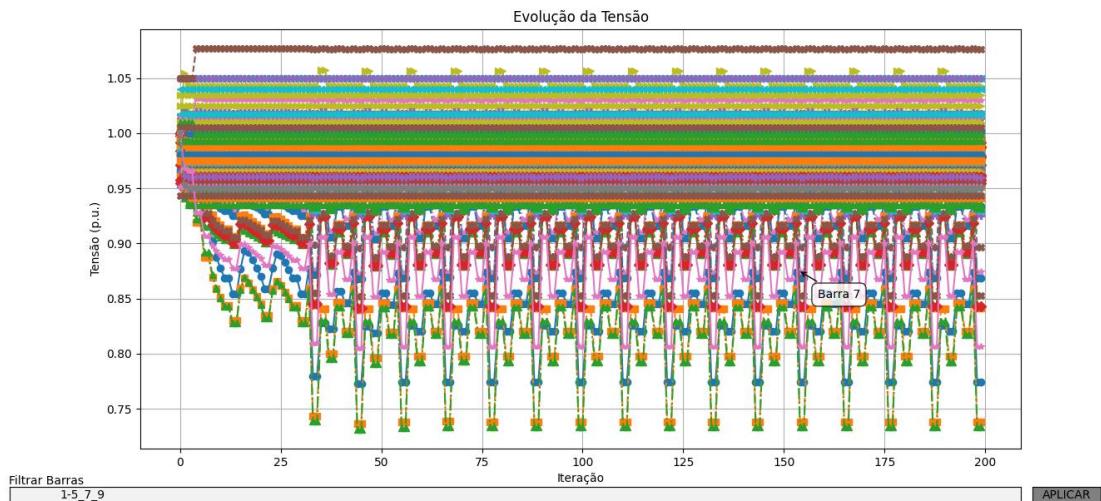
6.4.1 Divergência de identificação ou mal convergido

Segundo Zhao et al. (2008), ao se realizar a comutação de uma barra do tipo PQ para PV – ou seja quando se tenta regular a tensão em uma barra previamente não controlada – pode haver um descompasso significativo entre a tensão desejada (tensão de referência) e a tensão anterior da barra. Esse desvio, representado por ΔV , quando muito elevado, tende a provocar oscilações numéricas no processo iterativo de cálculo do fluxo de potência. Como consequência, ocorre uma alternância frequente no tipo da barra (entre PV e PQ), o que compromete a estabilidade do processo e dificulta a convergência do algoritmo.

Na prática, se demonstrou como um problema mal convergido onde as respostas ficam oscilando ao redor de um valor referência, e, portanto, levando a uma convergência lenta. Apareceram na simulação em dois momentos: momento próximo ao nariz da curva PV – onde se averigua rápido decaimento das tensões; e em algumas ocasiões onde barras

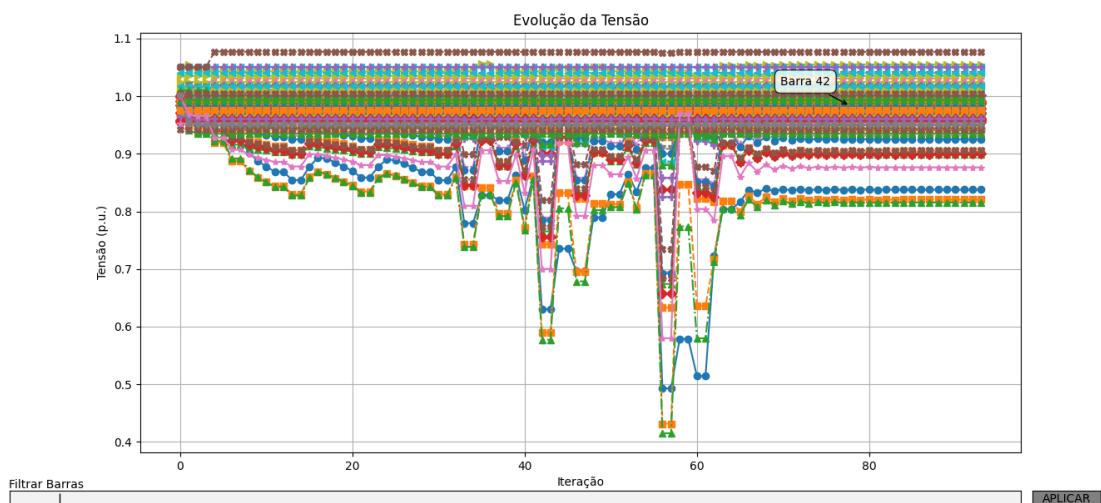
com controle de reativo próximos a barras de grande amplitude sobre o perfil da tensão. Nos casos longínquos da divergência numérica o uso de uma lógica suplementar como a lógica 1 é capaz de rediz significativamente o tempo de convergência além de permitir uma solução exata do fluxo de potência.

Figura 108: Tensões na Divergência de identificação - Sem lógica suplementar



Fonte: autoria própria.

Figura 109: Tensões na Divergência de identificação - lógica suplementar 1



Fonte: autoria própria.

7. INTERFACE GRÁFICA

7.1 Considerações Iniciais

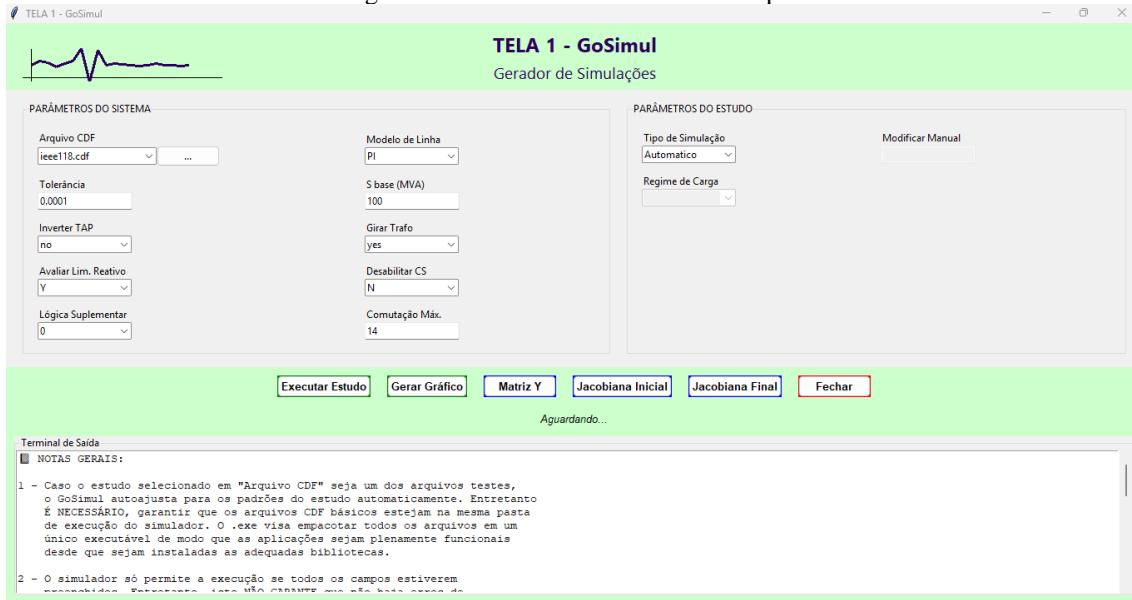
Com o intuito de proporcionar um ambiente interativo e acessível para execução dos estudos de estabilidade de tensão e controle reativo, foi desenvolvida uma

interface gráfica dedicada à integração dos três simuladores principais (GoSimul, GoCases e GoCurvs) ao sistema SimSEP. Essa interface buscou aliar usabilidade, robustez e clareza na apresentação dos dados, adotando como base a linguagem de programação Python e bibliotecas consolidadas para construção de aplicações gráficas e visualização de resultados.

A interface foi construída utilizando a biblioteca gráfica “Tkinter”, nativa do Python, o que garantiu portabilidade e leveza à aplicação. Para visualização gráfica dos resultados, foram utilizadas as bibliotecas “Matplotlib” e “NumPy”, sendo a primeira empregada na renderização de gráficos interativos como curvas PV, evolução de potência gerada e trajetórias de tensão. Já a “NumPy” foi responsável pelas operações vetoriais e numéricas essenciais à manipulação dos dados obtidos nas simulações.

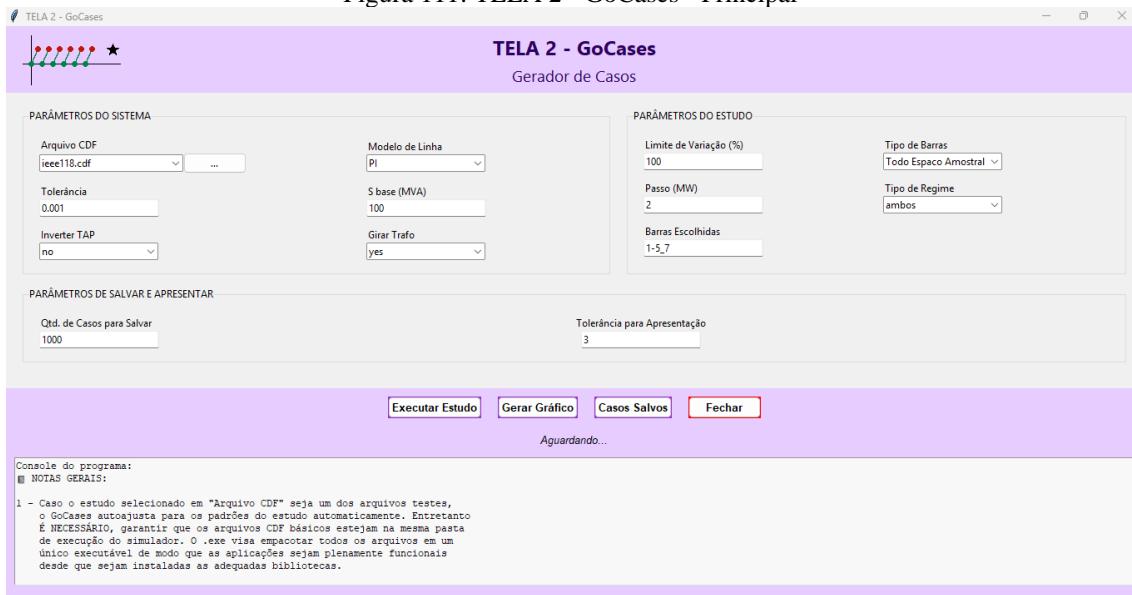
A interface foi segmentada em três módulos principais — **GoSimul**, **GoCases** e **GoCurvs** — cada qual com um layout específico, mas mantendo a uniformidade visual e lógica de operação. Os elementos centrais da interface incluem botões de execução (como “Executar Estudo”, “Gerar Gráficos” e “Salvar Resultados”), menus suspensos para seleção de arquivos CDF, campos de entrada para configuração de parâmetros e caixas de mensagem para exibição de logs e alertas.

Figura 110: TELA 1 - GoSimul - Principal



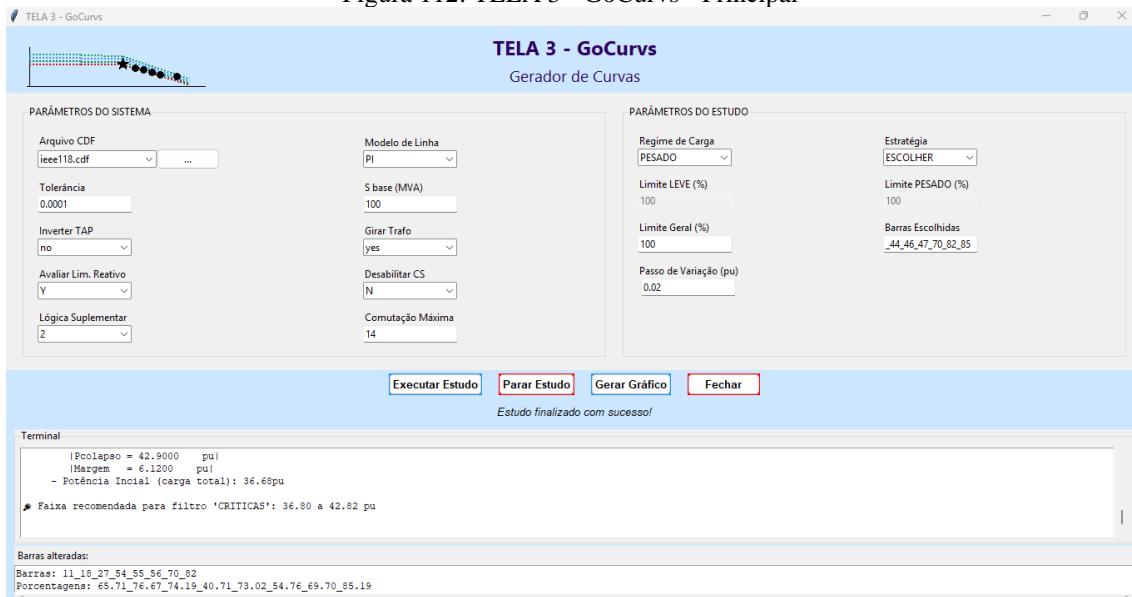
Fonte: autoria própria.

Figura 111: TELA 2 - GoCases - Principal



Fonte: autoria própria.

Figura 112: TELA 3 - GoCurvs - Principal



Fonte: autoria própria.

Destacam-se na aplicação os chamados “campos inteligentes”, que reagem dinamicamente à escolha de determinados parâmetros. Por exemplo, ao selecionar o arquivo CDF em um menu suspenso, os demais campos relacionados ao sistema (como “*S_base*”, “*modelo de linha*”, “*tolerância*” etc.) são automaticamente preenchidos com valores padrão adequados ao sistema escolhido. Além disso, certos campos são ativados ou desativados conforme a escolha de estratégia de simulação (“MAIORES” ou

“ESCOLHER”) ou tipo de regime (“LEVES”, “PESADOS”, “AMBOS”), prevenindo inconsistências na entrada de dados e garantindo maior robustez ao estudo.

Foi incorporado à interface um terminal interno que captura e exibe em tempo real as mensagens de execução, incluindo alertas, resultados intermediários e possíveis erros. Esse terminal permite ao usuário acompanhar toda a lógica do estudo sem recorrer ao terminal externo do sistema operacional, além de possibilitar a gravação automática dos logs no final de cada simulação para fins de rastreabilidade e auditoria.

Os resultados das simulações são apresentados de forma visual e estruturada. Foram incorporadas funcionalidades de geração automática de gráficos para análise de curvas PV e evolução de potências, com legendas inteligentes e filtros de visualização. Tabelas interativas também foram desenvolvidas, permitindo a visualização de dados filtrados por tipo de regime (leve ou pesado), com suporte a rolagem, seleção de colunas e ordenação automática dos resultados.

A aplicação manipula quatro tipos principais de arquivos: CDF, CSV, TXT e LOG, distribuídos em pastas específicas dentro do diretório do executável. A TELA 1 é voltada para análise e visualização, permitindo a leitura de arquivos CDF (de qualquer diretório) e de arquivos CSV com instruções para construção de gráficos evolutivos de fluxo de potência (tensão, ângulo, mismatch P e mismatch Q), gerados previamente pela TELA 3. Essa tela não realiza salvamentos de arquivos. Já a TELA 2 é responsável pela geração de novos casos, salvando arquivos CDF modificados na pasta `plot\cdfsGerados\G_TELA2`, arquivos TXT com os dados característicos dos casos em `plot\GenOfCases` e arquivos LOG com os resultados consolidados para análises posteriores.

Por sua vez, a TELA 3 realiza a construção de curvas PV e gera arquivos CSV ou TXT com os dados das curvas em `plot\GenOfCurvs`. Além disso, ela identifica e armazena pontos relevantes para análises pontuais na TELA 1, como pontos anômalos ou mal convergidos (`abnormais.csv`) e casos de divergência numérica (`divergencias.csv`), ambos salvos em `plot\GenOfSimul`. Essa estrutura organizada permite que cada tela opere de forma independente, ao mesmo tempo em que compartilha informações relevantes para aprofundar as análises de estabilidade e comportamento do sistema elétrico.

```

Executável/
|
└── plot/
    ├── cdfsGerados/
    │   └── G_TELA2/           → CDFs dos casos gerados (TEL A 2)
    |
    ├── GenOfCases/          → TXT e LOG para gráfico e registro (TEL A 2)
    |
    ├── GenOfCurvs/          → Pontos das curvas PV em CSV/TXT (TEL A 3)
    |
    └── GenOfSimul/           → Pontos anormais e divergências (TEL A 3)

```

Toda a aplicação foi modularizada, permitindo a separação entre os arquivos de lógica, visualização e execução. Arquivos auxiliares como ícones, imagens e arquivos CDF foram integrados via compactação (ZIP) e extração em tempo de execução, garantindo que a aplicação possa ser distribuída como um executável único (.exe) sem perda de funcionalidades. Esse processo foi gerenciado pelo PyInstaller, com scripts personalizados para embutir e organizar os recursos de forma centralizada. O resultado é uma ferramenta poderosa e didática, capaz de auxiliar tanto no ensino quanto na análise crítica de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência. Os simuladores foram disponibilizados publicamente no GitHub para fins de reproduzibilidade e transparência dos estudos realizados (GARCIA, 2025).

7.2 TELA 1 – GoSimul

O botão principal do GoSimul é o “*Executar Estudo*” que vai levar a simulação conforme os parâmetros selecionados na TELA principal. O resultado é uma tabela com os dados de fluxo de potência como o exemplo da figura X, além de um relatório no terminal conforme exemplo abaixo.

Figura 113: TELA 1 - GoSimul - Resultado "Executar Estudo" - Exemplo IEEE 9 Barras

Index	DeltaV	Delta0 (graus)	PotP	PotQ	Controles de l	Tipo de Barra	Tipo Final	Pot. P Ger.	Pot. Q Ger.	Limite min/M
1	1.0000	0.0000	0.7194	0.2191	1.0000	swing	swing	0.7194	0.2191	-0.4 / 0.5
2	1.0000	9.6208	1.6300	0.1193	1.0000	G	N	1.6300	0.1193	0.0 / 0.4
3	1.0079	4.6562	0.8500	-0.0000	1.0000	G	Y	0.8500	-0.0000	-0.4 / 0.5
4	0.9882	-2.4030	0.0000	0.0000	0	-	Y	0.0000	0.0000	0.0 / 0.4
5	0.9784	-4.0176	-0.9000	-0.3000	0	-	Y	0.0000	0.0000	0.0 / 0.4
6	1.0091	1.8490	-0.0000	0.0000	0	-	Y	0.0000	0.0000	0.0 / 0.4
7	0.9890	0.5808	-1.0000	-0.3500	0	-	Y	0.0000	0.0000	0.0 / 0.4
8	0.9978	3.7605	-0.0000	0.0000	0	-	Y	0.0000	0.0000	0.0 / 0.4
9	0.9591	-4.3483	-1.2500	-0.5000	0	-	Y	0.0000	0.0000	0.0 / 0.4

Fonte: autoria própria.

Relatório da simulação 1 (Figura 113):

ESTUDO EXECUTADO: Simulação #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1 #1

- Estudo para os parâmetros escolhidos na TELA 1.

Parâmetros utilizados:

- SYName: ieee9_Marcelo.cdf
 - MODELin: PI
 - Tolerancia: 0.0001
 - HabilAval_Lim_Reativo: Y
 - S_base: 100
 - tipoDeSimulacao: Automatico
 - entrad_rodarManual:
 - Regime_de_CARGA:
 - Desabilitar_CS: N
 - Tipo_de_logicaSuplementar: 0
 - ComutacaoMaxima: 14
 - Ativar_inverter: no

- GirarTrafo: no

☒ Convergido na iteração: 6

Ψ Potências de perdas:

- Potência Ativa das Perdas (pu): 0.049356
- Potência Reativa das Perdas (pu): -0.811536
- Potência Aparente Total das Perdas (pu): 0.813036

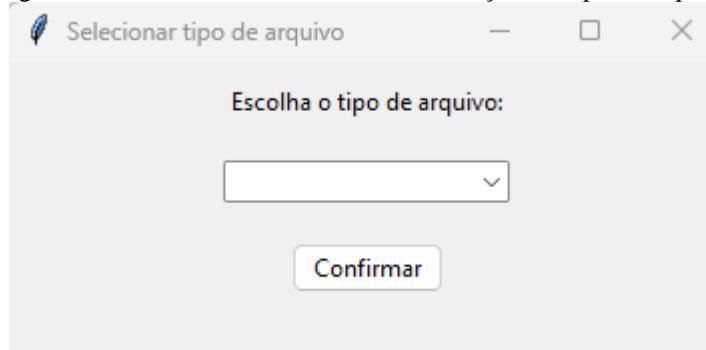
📄 Barras com controle de tensão perdido:

▽ Barra 3 - Tensão de Controle: 1.0000 pu - Tensão Final: 1.0079 pu

>>> Total de Barras: 1

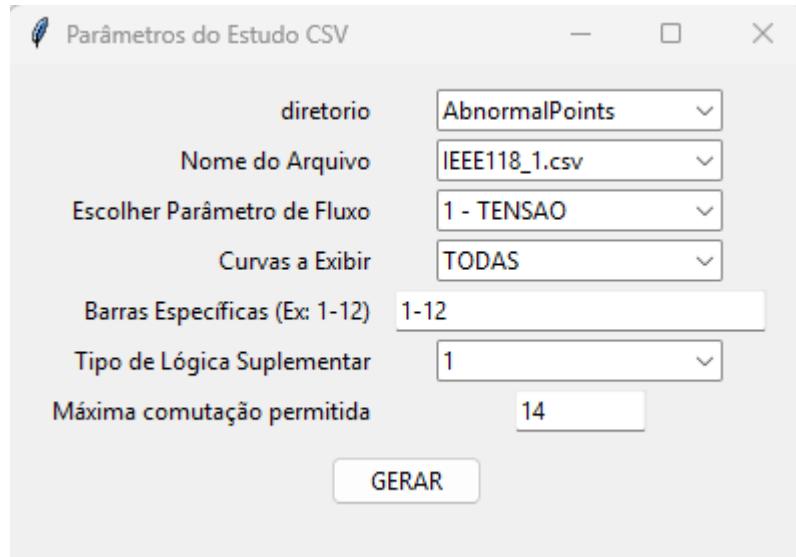
O botão “Gerar Gráfico” da TELA 1 leva a tela de seleção se CSV ou pelo próprio CDF conforme imagem da Figura 114. Ao escolher CDF, então será formado a curva evolutiva dos parâmetros elétricos conforme estão selecionados na TELA 1. Caso seja selecionado CSV, então o usuário poderá criar gráficos de pontos salvos pela TELA 3 (pontos críticos ao sistema como divergências). Em ambas formas de seleção de gráfico, os parâmetros elétricos que são permitidos serem visualizados incluem a evolução de Tensão, ângulo, “Mismatch” de potência P, “Mismatch” de potência Q e os filtros de seleção de curva permite selecionar o tipo de barra que se deseja mostrar. Especificamente para a geração de gráfico CSV, há ainda a possibilidade de alteração do tipo de lógica suplementar para avaliação de casos mal convergidos (“AbnormalPoints”) ou divergências (“Divergencies”). Ao clicar em gerar, um gráfico é aberto usando as bibliotecas Tkinter como será comentado mais adiante e os nos gráficos também é permitida uma filtragem de barras.

Figura 114: TELA 1 - GoSimul - Tela de seleção de Tipo de arquivo



Fonte: autoria própria.

Figura 115: TELA 1 - GoSimul - Tela de seleção de seleção de gráfico CSV



Fonte: autoria própria.

Ainda na TELA 1 é possível gerar as matrizes principais do fluxo de potência analisado como a matriz de admitâncias, ou as matrizes de resolução do fluxo como a Jacobianas Iniciais e Finais conforme os parâmetros escolhidos na tela principal.

Figura 116: GoSimul - Matriz Y - Exemplo IEEE 9 Barras

Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9
0.0000-17.3611j	0	0	0.0000+17.3611j	0	0	0	0	0
0	0.0000-16.0000j	0	0	0	0	0	0.0000+16.0000j	0
0	0	0.0000-17.0648j	0	0	0.0000+17.0648j	0	0	0
0.0000+17.3611j	0	0	3.3074-39.3089j	-1.9422+10.5107j	0	0	0	-1.3652+11.6041j
0	0	0	-1.9422+10.5107j	3.2242-15.8409j	-1.2820+5.5882j	0	0	0
0	0	0.0000+17.0648j	0	-1.2820+5.5882j	2.4371-32.1539j	-1.1551+9.7843j	0	0
0	0	0	0	0	-1.1551+9.7843j	2.7722-23.3032j	-1.6171+13.6980j	0
0	0.0000+16.0000j	0	0	0	0	-1.6171+13.6980j	2.8047-35.4456j	-1.1876+5.9751j
0	0	0	-1.3652+11.6041j	0	0	0	-1.1876+5.9751j	2.5528-17.3382j

Fonte: autoria própria.

Figura 117: GoSimul - Jacobiana Inicial - Exemplo IEEE 9 Barras

	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15
	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	V4	V5	V6	V7	V8	V9	
P2	-16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P3	0.0	-17.0648	0.0	0.0	17.0648	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P4	0.0	0.0	-39.4758	10.5106	0.0	0.0	0.0	11.6040	-3.3073	1.9421	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3651
P5	0.0	0.0	10.51068	-16.098	5.58824	0.0	0.0	0.0	1.94219	-3.224	1.2820	0.0	0.0	0.0	0.0
P6	0.0	17.06484	0.0	5.58824	-32.437	9.7842	0.0	0.0	0.0	1.2820	-2.437	1.1550	0.0	0.0	0.0
P7	0.0	0.0	0.0	0.0	9.78427	-23.48	13.6979	0.0	0.0	0.0	1.1550	-2.772	1.6171	0.0	0.0
P8	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.697	-35.673	5.97513	0.0	0.0	0.0	1.6171	-2.804	1.1876	0.0
P9	0.0	0.0	11.60409	0.0	0.0	0.0	5.97513	-17.579	1.36518	0.0	0.0	0.0	1.1876	-2.552	0.0
Q4	0.0	0.0	3.307378	-1.9421	0.0	0.0	0.0	-1.3651	-39.141	10.510	0.0	0.0	0.0	0.0	11.604
Q5	0.0	0.0	-1.94219	3.22420	-1.2820	0.0	0.0	0.0	10.5106	-15.58	5.5882	0.0	0.0	0.0	0.0
Q6	0.0	0.0	0.0	-1.2820	2.43709	-1.155	0.0	0.0	0.0	5.5882	-31.87	9.7842	0.0	0.0	0.0
Q7	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.1550	2.7722	-1.6171	0.0	0.0	0.0	9.7842	-23.12	13.697	0.0	0.0
Q8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.617	2.80472	-1.1876	0.0	0.0	0.0	13.697	-35.21	5.9751	0.0
Q9	0.0	0.0	-1.36518	0.0	0.0	0.0	-1.1876	2.55279	11.6040	0.0	0.0	0.0	5.9751	-17.09	0.0

Fonte: autoria própria.

Figura 118: GoSimul - Jacobiana Final - Exemplo IEEE 9 Barras

	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15	Col 16
	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	
P2	-15.8807	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.8807	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.6336	0.0	
P3	0.0	-17.3350	0.0	0.0	17.3350	0.0	0.0	0.0	-0.8433	0.0	0.0	-0.8423	0.0	0.0	0.0	
P4	0.0	0.0	-38.3909	10.2124	0.0	0.0	0.0	11.0363	0.0	-3.2685	1.6259	0.0	0.0	0.0	0.9590	
P5	0.0	0.0	10.10657	-15.465!	5.35934	0.0	0.0	0.0	0.0	2.18938	-2.234	1.80671	0.0	0.0	0.0	
P6	0.0	17.33501	0.0	5.61810	-32.741	9.7882	0.0	0.0	0.84335	0.0	0.7105	-2.4592	0.9467	0.0	0.0	
P7	0.0	0.0	0.0	0.0	9.73722	-23.14!	13.4083	0.0	0.0	0.0	0.0	1.35633	-1.730	2.34840	0.0	
P8	15.88079	0.0	0.0	0.0	0.0	13.585	-35.287	5.82108	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8529	-2.7984	0.3321	
P9	0.0	0.0	10.94853	0.0	0.0	0.0	5.50047	-16.449!	0.0	1.68640	0.0	0.0	0.0	1.93598	-1.145	
Q3	0.0	-0.85000	0.0	0.0	0.85000	0.0	0.0	0.0	-17.199	0.0	0.0	17.1994	0.0	0.0	0.0	
Q4	0.0	0.0	3.230148	-1.5909!	0.0	0.0	0.0	-0.9198!	0.0	-38.847	10.226	0.0	0.0	0.0	11.078	
Q5	0.0	0.0	-2.16366	3.98681	-1.8231	0.0	0.0	0.0	0.0	10.4371	-15.19	5.74176	0.0	0.0	0.0	
Q6	0.0	-0.85000	0.0	-0.6952!	2.48163	-0.936	0.0	0.0	17.1787	0.0	5.3110	-32.446	9.6494	0.0	0.0	
Q7	0.0	0.0	0.0	-1.3686!	3.7118	-2.3431	0.0	0.0	0.0	0.0	9.89664	-22.69	13.7358	0.0	0.0	
Q8	-1.62999	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.843!	2.79219	-0.3185!	0.0	0.0	0.0	0.0	13.438	-35.366	5.5128	
Q9	0.0	0.0	-1.66659	0.0	0.0	0.0	-1.9316	3.59825	0.0	11.5070	0.0	0.0	0.0	6.06931	-16.10	

Fonte: autoria própria.

7.3 TELA 2 – GoCases

Na TELA 2, é possível tanto gerar um estudo novo quanto gerar um caso salvo pelo botão “Casos Salvos” ou ainda carregar um gráfico do caso salvo (salvo no formato .txt).

Ao selecionar os parâmetros de estudo e clicar em executar, o terminal informará as etapas de execução e o tempo que cada etapa levou – console do programa. No final do processo, é aberto uma tabela de resultados conforme exemplo da figura a seguir. A tabela, além de contemplar os mesmos dados conforme resultados do 86, a tabela de resultados também traz o nome do arquivo CDF do caso salvo no diretório “plot\cdfsGerados\G_TELA2”.

Figura 119: GoCases - Resultado "Executar Estudo" - Exemplo IEEE 9 Barras

Informações Iniciais

Estudo inicial	Qtd. Violações	Barras Violadas	Limite infligidos
ieee9_Marcelo.cdf	1 de 3	3	ViolaPB

Casos de regime leve detectados

Tag	Pot. Ativa Removic	Barras Alteradas	Vetor Porcentagem	Limite Violado	Qualidade	Qtd. Violações	Status Demais	Arquivo Salvo (GoCases)
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_46
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_47
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_48
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_49
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_50
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_51
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_52
PQ	-98.0000	7	-98	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_53

Casos de regime pesado detectados

Tag	Pot. Ativa Adicionada	Barras Alteradas	Vetor Porcentagem	Limite Violado	Qualidade	Qtd. Violações	Status Demais	Arquivo Salvo (GoCases)
PQ	48.0000	5	53	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_27
PQ	58.0000	7	58	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_28
PQ	48.0000	5	53	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_29
PQ	58.0000	7	58	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_30
PQ	48.0000	5	53	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_31
PQ	58.0000	7	58	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_32
PQ	48.0000	5	53	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_33
PQ	58.0000	7	58	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_34
PQ	60.0000	5,7	33,30	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_35
PQ	48.0000	5	53	3	MELHOR	0 de 3	AP	ieee9_Marcelo_36

Fonte: autoria própria.

Console do programa (Figura 119): INICIANDO ESTUDO DE CASOS

💡 Principais parâmetros do estudo:

- Sistema: ieee9_Marcelo.cdf
- Barras: 1-5_7
- Passo: 2
- Regime: ambos
- Regime: 100

12 34 Barras Escolhidas:

- > Barra: 1 - Potência ativa de carga: 0.0000 MW
- > Barra: 2 - Potência ativa de carga: 0.0000 MW
- > Barra: 3 - Potência ativa de carga: 0.0000 MW
- > Barra: 4 - Potência ativa de carga: 0.0000 MW
- > Barra: 5 - Potência ativa de carga: 90.0000 MW
- > Barra: 7 - Potência ativa de carga: 100.0000 MW

 Processando Estudo:

```
[01:39:16, 'INICIALIZAÇÃO ']
[01:39:16, 'ANÁLISE COMBINATÓRIA ']
[01:39:16, 'ANÁLISE DE PONTOS CANDITADOS: REGIME PESADO ']
[01:39:16, 'ANÁLISE DE PONTOS CANDITADOS: REGIME LEVE ']
[01:39:16, 'ANÁLISE DE FRONTRERA: REGIME PESADO', 19, '-PONTOS DETECTADOS']
[01:39:20, 'ANÁLISE DE FRONTRERA: REGIME LEVE', 8, '-PONTOS DETECTADOS']
[01:39:22, 'FINALIZANDO CÁLCULO ']
[01:39:22, 'PLOTAGEM ']
```

- Arquivos CDF de casos gerados salvos com sucesso no diretório:

C:\Users\victo\Desktop\TESTE\TELA2\RevE\plot\cdfsGerados\G_TELA2\IEEE9_M_ARCELO

- Arquivo TXT para a construção do gráfico salvas em:

C:\Users\victo\Desktop\TESTE\TELA2\RevE\plot\GenOfCases\IEEE9_1.txt

- Arquivos LOG de casos gerados salvos com sucesso em:

C:\Users\victo\Desktop\TESTE\TELA2\RevE\plot\GenOfCases\IEEE9_1.log

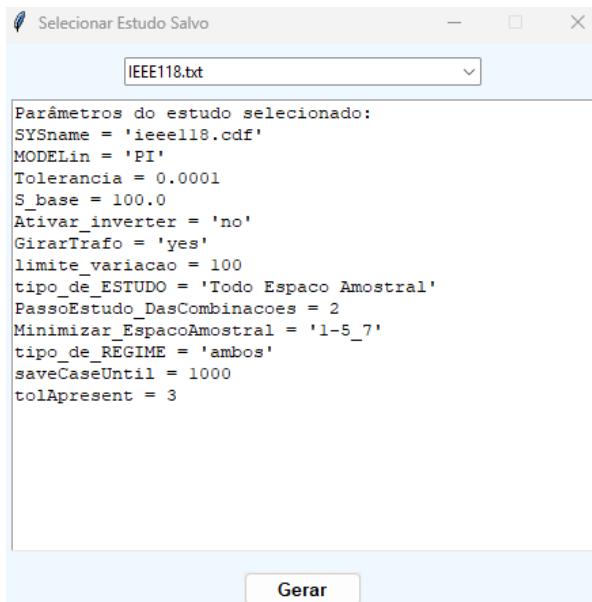
O botão “Caso Salvo” leva a uma tela para determinar a leitura do caso que foi salvo no respectivo diretório conforme comentado no subitem 7.1 Considerações Iniciais. A TELA 2 também permite a geração de gráficos característicos do estudo conforme foi apresentado no item 6.

Figura 120: TELA 2 - GoCases - Casos Salvos



Fonte: autoria própria.

Figura 121: TELA 2 - GoCases - Casos Salvos para gráfico

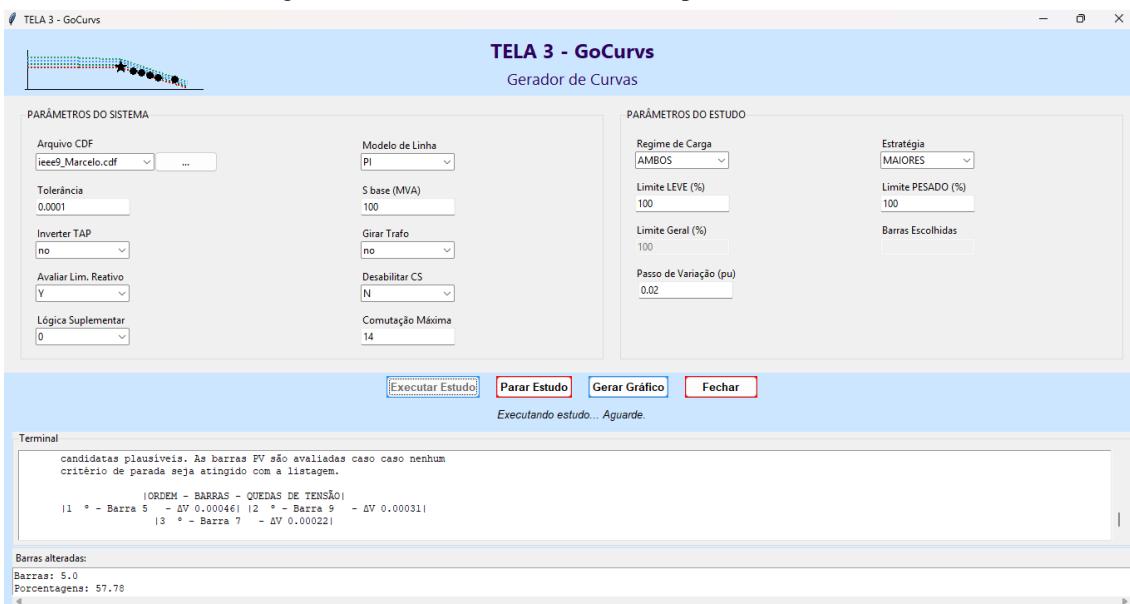


Fonte: autoria própria.

7.4 TELA 3 – GoCurvs

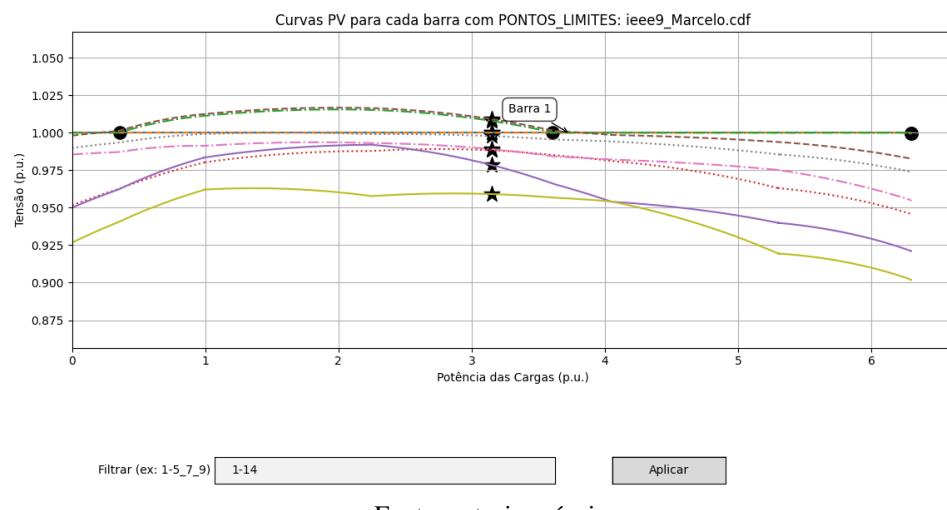
Na TELA 3, é possível tanto gerar um gráfico novo (botão “Executar Estudo”) quanto gerar um caso salvo pelo botão “Gerar Gráfico”. Ao “Executar Estudo” as características do estudo serão lidas e enviadas ao simulador que deverá retornar com o gráfico PV escolhido. Enquanto executa, dois terminais exibem o progresso, no terminal superior, algumas informações básicas sobre a curva selecionada e que também deverão ser salvos no final da execução como log. O terminal 2 é apenas informativo e mostra evolutivamente as barras que sofrem alteração para a construção do gráfico. A qualquer momento, pode-se parar o estudo sem perdas de dados, ou seja, a curva montada até o momento desejado é retornada. Uma figura então é salva e recarregada no processo além de todo terminal coletado e armazenado no LOG para futuras consultas. A figura construída por intermédio das bibliotecas externas ao Python permite a visualização das legendas acima de cada conteúdo do gráfico além de permitir uma filtragem dinamizada das barras do resultado.

Figura 122: TELA 3 - GoCurvs - Exemplo IEEE 9 Barras



Fonte: autoria própria.

Figura 123: TELA 3 - GoCurvs - Exemplo IEEE 9 Barras



Fonte: autoria própria.

Log do estudo executado e salvo (IEEE 9 barras):

INICIANDO MONTAGEM DAS CURVAS PV
SISTEMA ieee9_Marcelo.cdf - ESTRATÉGIA MAIORES

- Avaliação de regime LEVE: Barras de MAIORES impactos identificadas.
- Desligamento de cargas (potência ativa).
 - Alteração COMPLETA nas potências das Barras avaliadas na listagem de maiores impactos sobre a queda de tensão.

 Barras de Maior Impacto sobre as tensões:

- São criadas duas listas de controle: Barras de maior impacto e o registro da maior queda de tensão encontrada ao subtrair a potência da barra de um degrau conhecido (passo).
- A lista Barras de maior impacto corresponde a barra identificada cuja alteração pelo passo leva a maior queda de tensão de alguma barra do sistema. Esta barra não necessariamente corresponde a barra que teve a maior queda - a menos que sua potência comece a ser relevante sobre o sistema.
- O algoritmo define a listagem a partir da queda de tensão registrada e, portanto, apenas as barras PQ no momento inicial da avaliação são candidatas plausíveis. As barras PV são avaliadas caso nenhum critério de parada seja atingido com a listagem.

|ORDEM - BARRAS - QUEDAS DE TENSÃO|
|1 ° - Barra 5 - ΔV 0.00045| |2 ° - Barra 9 - ΔV 0.00030|
|3 ° - Barra 7 - ΔV 0.00021|

 Barras com potências ativas efetivamente ALTERADAS

- Percentual de Alteração: 100 %
- Barras:
5, 9, 7

 Todas barras de maiores impactos alteradas com sucesso.

>>> Regime LEVE finalizado ou interrompido.

- Aguardando autorização para iniciar o PESADO...

 Avaliação de regime PESADO: Barras de MAIORES impactos identificadas.

- Religamento de cargas (potência ativa).
- Alteração COMPLETA nas potências das Barras avaliadas na listagem de maiores impactos sobre a queda de tensão.

 Barras de Maior Impacto sobre as tensões:

- São criadas duas listas de controle: Barras de maior impacto e o registro da maior queda de tensão encontrada ao adicionar a potência da barra de um degrau conhecido (passo).
- A lista Barras de maior impacto corresponde a barra identificada cuja alteração pelo passo leva a maior queda de tensão de alguma barra do sistema. Esta barra não necessariamente corresponde a barra que teve a maior queda - a menos que sua potência comece a ser relevante sobre o sistema.
- O algoritmo define a listagem a partir da queda de tensão registrada e, portanto, apenas as barras PQ no momento inicial da avaliação são

candidatas plausíveis. As barras PV são avaliadas caso nenhum critério de parada seja atingido com a listagem.

|ORDEM - BARRAS - QUEDAS DE TENSÃO|
 |1 ° - Barra 5 - ΔV 0.00046| |2 ° - Barra 9 - ΔV 0.00031|
 |3 ° - Barra 7 - ΔV 0.00022|

 Barras com potências ativas efetivamente ALTERADAS

- Percentual de Alteração: 100 %
- Barras:
5, 9, 7

Todas barras de maiores impactos alteradas com sucesso.

 Avaliação de regime LEVE: Complementando com barras NÃO LISTADAS.

- Desligamento de cargas (potência ativa).
- Alteração SEQUENCIAL nas potências das Barras NÃO avaliadas na listagem de maiores impactos sobre a queda de tensão.

 Avaliação de regime PESADO: Complementando com barras NÃO LISTADAS.

- Religamento de cargas (potência ativa).
- Alteração SEQUENCIAL nas potências das Barras NÃO avaliadas na listagem de maiores impactos sobre a queda de tensão.

Salvamento concluído com êxito.

- Arquivo para o gráfico salvo em:
 C:\Users\victo\Desktop\TESTE\TELA3\RevD\plot\GenOfCurvs\IEEE9_1.csv

 Estudo finalizado com sucesso!

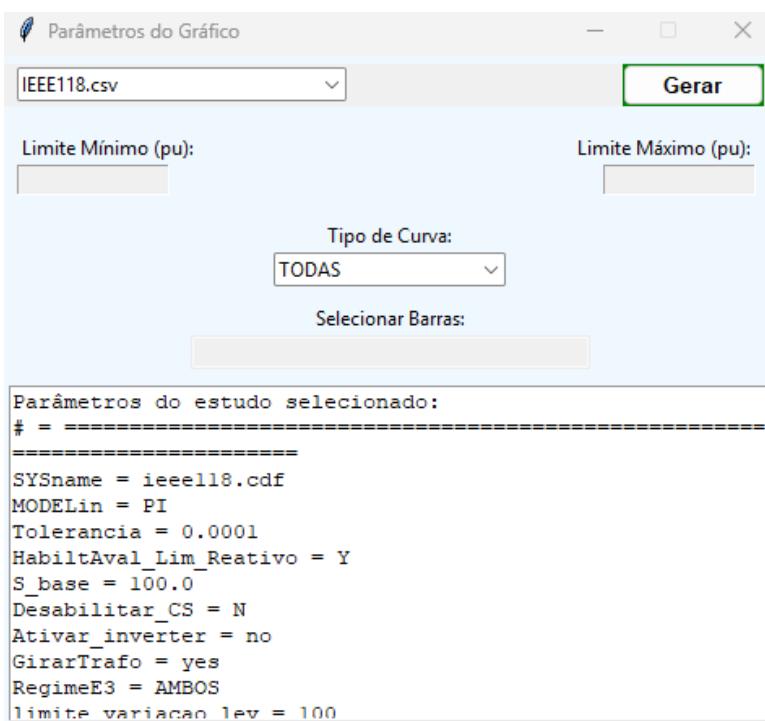
 FINALIZANDO MONTAGEM DAS CURVAS PV
 SISTEMA ieee9_Marcelo.cdf - ESTRATÉGIA MAIORES

Nenhum colapso de tensão detectado.

 Faixa recomendada para filtro 'CRITICAS': 0.10 a 6.20 pu

O botão “Gerar Gráfico” leva a uma tela para determinar a leitura do caso que foi salvo no respectivo diretório. Nesta tela também é possível o uso de filtros personalizados para visualizar as curvas PV de todo tipo de barra como barras PV, barras PQ, além de permitir a escolha de barras ou apenas as barras críticas definidas dentro de um limite de potência escolhido (informado como uma dica no terminal quando rodado o gráfico pela primeira vez sem o uso de filtros ou na primeira execução do estudo). Os dados básicos do estudo executado são mostrados na tela de seleção do estudo salvo e todo o Log do estudo é recarregado ao clicar em “Gerar”.

Figura 124: TELA 3 - GoCurvs - Casos Salvos para gráfico



Fonte: autoria própria.

7.5 Bibliotecas Utilizadas

O desenvolvimento da interface gráfica exigiu a utilização de diversas bibliotecas da linguagem Python, algumas integradas à distribuição padrão da linguagem, e outras que requerem instalação prévia por meio de ferramentas como o pip. Recomenda-se a utilização de versões recentes do Python (≥ 3.8) para assegurar a compatibilidade com todas as funcionalidades e bibliotecas utilizadas, especialmente

para suporte completo à renderização gráfica, tipagem dinâmica e empacotamento com PyInstaller.

7.5.1 Bibliotecas Nativas do Python

As seguintes bibliotecas fazem parte da biblioteca padrão (standard library) do Python e não requerem instalação adicional:

- *tkinter / ttk*: Toolkit gráfico nativo do Python para construção de interfaces visuais.
- *threading*: Permite execução paralela (multi-thread) para manter a interface responsiva durante processos pesados.
- *os, sys, shutil, zipfile*: Bibliotecas padrão para manipulação de arquivos, diretórios e recursos do sistema operacional.
- *csv*: Leitura e escrita de arquivos CSV (Comma-Separated Values).
- *datetime*: Manipulação de datas e horários.
- *math*: Funções matemáticas básicas.
- *glob*: Busca e filtragem de arquivos por padrões (ex: *.csv).
- *re*: Expressões regulares.
- *ast*: Interpretação segura de strings Python como estruturas de dados (ex: listas).

7.5.2 Bibliotecas Externas

As bibliotecas abaixo não fazem parte do Python padrão e devem ser instaladas com o comando `pip install <nome_da_biblioteca>`:

- *numpy*: Biblioteca para operações numéricas eficientes, incluindo matrizes, vetores e funções matemáticas avançadas.
- *matplotlib*: Geração de gráficos científicos e interativos (curvas PV, potência gerada, tensão).
- *mplcursors*: Adiciona cursores interativos aos gráficos do Matplotlib, permitindo inspeção de pontos.
- *scipy.interpolate*: Módulo da biblioteca SciPy para interpolação de dados, útil na suavização de curvas PV.
- *statsmodels*: Ferramentas estatísticas para regressões e análise de séries temporais.
- *PyInstaller*: Ferramenta externa usada para empacotar a aplicação em um único executável para distribuição.

É recomendado que o ambiente Python esteja atualizado (versão 3.8 ou superior), preferencialmente com o uso de ambientes virtuais (`venv` ou `conda`) para garantir a organização das dependências. A instalação pode ser feita diretamente pela linha de comando do sistema operacional.

8. CONCLUSÃO

8.1 Considerações Iniciais

Ao longo deste trabalho foram desenvolvidos três simuladores complementares – **GoSimul**, **GoCases** e **GoCurvs** – para atender às necessidades específicas de análise do SimSEP. Os resultados mostraram que o GoSimul reproduz o fluxo de potência com controle de tensão por injeção de potência reativa e mantém coerência numérica com os valores de referência para todos os sistemas IEEE avaliados. O GoCases revelou-se capaz de localizar fronteiras operativas críticas sob a ótica de limites reativos, enquanto o GoCurvs permitiu traçar, de forma expedita, curvas PV completas e identificar rapidamente barras críticas em cada sistema. A combinação das três ferramentas amplia a robustez analítica do SimSEP, agregando módulos de pré-processamento (GoSimul), exploração do espaço de estados (GoCases) e varredura de estabilidade de tensão (GoCurvs).

A integração dos módulos GoSimul, GoCases e GoCurvs ao SimSEP cumpre o objetivo principal de fornecer uma base sólida de treinamento para futuras implementações de estratégias de controle por injeção de potência reativa com análise de limites operativos. Essas ferramentas foram concebidas com o intuito de aproximar o ambiente acadêmico das exigências práticas de operação de sistemas elétricos, especialmente no que tange à avaliação da margem de estabilidade de tensão e à antecipação de situações críticas. Mesmo diante de limitações inerentes, como o tempo de processamento elevado em certas simulações e a simplificação na modelagem de cargas, os resultados obtidos demonstram a robustez da abordagem adotada e indicam caminhos promissores para inovações futuras.

O controle de potência reativa adotado nos simuladores considera critérios operacionais típicos da literatura e da prática de operação. No contexto do GoSimul, por exemplo, os geradores são modelados como barras PV, sendo mantida a tensão especificada até que os limites mínimo e máximo de potência reativa (“ Q_{min} ” e “ Q_{max} ”) sejam atingidos. Ao extrapolar tais limites, a barra muda seu tipo para PQ, com a tensão passando a ser consequência do balanço de potências. Esse procedimento visa garantir que a operação dos geradores respeite as faixas técnicas e de segurança definidas pelos fabricantes ou operadores do sistema. Do ponto de vista da tensão, as trocas de tipologia

são consideradas coerentes se a tensão resultante após a conversão da barra PV para PQ permanece dentro dos limites operativos pré-definidos (geralmente entre 0,95 e 1,05 pu). Caso contrário, a simulação é interrompida ou marcada como instável.

Um fenômeno recorrente nos estudos, especialmente nos realizados com o GoCases e o GoCurvs, é a identificação de "barras de difícil identificação". Esse termo se refere a barras geradoras que apresentam instabilidade durante o processo iterativo de resolução, com mudanças bruscas e sucessivas entre os estados PV e PQ. Tal comportamento geralmente está associado a duas condições principais: (i) a barra geradora está próxima de outras barras de carga com quedas ou elevações acentuadas de tensão, o que dificulta a estabilização dos fluxos de potência; (ii) a própria fonte geradora encontra-se operando próxima de seus limites de potência reativa, o que reduz sua capacidade de manter a tensão desejada mesmo após ajustes incrementais.

Em síntese, a análise detalhada dos resultados obtidos com os três simuladores revela não apenas a capacidade de reprodução das condições reais de operação dos sistemas elétricos, mas também a importância de considerar critérios bem fundamentados para a troca de tipologias de barra, avaliação de limites operativos e diagnóstico de convergência. A aplicação integrada dos módulos GoSimul, GoCases e GoCurvs fortalece a base computacional do SimSEP e se mostra como um alicerce para o desenvolvimento de ferramentas mais sofisticadas e realistas para suporte à decisão em tempo real. Os simuladores foram disponibilizados publicamente no GitHub com o intuito de fomentar iniciativas acadêmicas e promover a reproduzibilidade dos estudos desenvolvidos.

8.1 Pontos Fortes e Fracos dos Simuladores

8.1.1 TELA 1 - GoSimul

Pontos Fortes:

- Controle de tensão por injeção de potência reativa, respeitando limites de geração.
- Algoritmo Full-Newton rápido, com convergência típica em poucas iterações.

Pontos Fracos:

- Restrito a uma única barra swing — não permite realocação automática da referência de fase.
- Inserção da verificação de limites no loop iterativo adiciona um “polo” de instabilidade, podendo aumentar o número de iterações ou causar divergência em condições extremas.
- Falta de integração com Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para redistribuir geração ativa e reativa em tempo real.

8.1.2 TELA 2 - GoCases

Pontos Fortes:

- Identifica barras imediatamente críticas em termos de suporte de potência reativa.
- Gera automaticamente casos de estudo que expandem a base de treinamento do SimSEP.

Pontos Fracos:

- Tempo de execução elevado quando o número de barras a combinar supera ~20.
- Permanece limitado a potências ativas de carga constantes (modelo P-constante), negligenciando modelos ZIP e a participação de carga na geração de Q.
- Requer múltiplas iterações para mapear todas as fronteiras de Q, já que considera apenas um subconjunto das combinações em cada rodada.

8.1.3 TELA 3 - GoCurvs

Pontos Fortes:

- Traça curvas PV completas em menos tempo, exibindo todas as barras simultaneamente.
- Estratégia “MAIORES” encontra automaticamente as barras com maior sensibilidade de tensão.

Pontos Fracos:

- Depende da pré-seleção de barras ou da heurística MAIORES; resultados podem variar se a heurística não refletir o estado real do sistema.

- Análise puramente estática; não captura dinâmicas transitórias ou variações rápidas de carga.

8.2 Premissas e Escolha dos Parâmetros

Os três simuladores compartilham premissas fundamentais, dentre as quais se destacam: (i) manutenção das potências ativas de geração constantes, excetuando-se a barra swing; (ii) alteração apenas de potências ativas de carga para investigar margens de tensão; (iii) uso de modelos de linha π e transformadores ideais sem defasagem angular. (iv) A escolha dos parâmetros — por exemplo, tolerância de convergência (10^{-3}), passo de combinação (1 MW) e limites de variação leve/pesado — foi calibrada com base em testes sistemáticos apresentados nos Capítulos 4, 5 e 6, de modo a equilibrar precisão numérica e tempo de processamento. (v) o máximo de iterações de fluxo de potência por default é 200.

8.3 Trabalhos Futuros

Entre as extensões mais promissoras destacam-se:

1. Utilização dos códigos fontes para treinamento do SimSEP (em MATLAB) de modo a implementar o recurso de avaliação de limite de reativo das fontes para o completo controle de tensão.
2. Integração do gerador de casos e do gerador de curvas a uma nova versão do SimSEP possibilitando a implementação de alarmes e “*trips*” de segurança.
3. Integração de Fluxo de Potência Ótimo, permitindo a relocação dinâmica da barra de referência e a otimização simultânea de perdas, custos, dentre outros.
4. Implementação de modelos ZIP para cargas, incluindo a participação de potência reativa das cargas.
5. Implementação de transformadores defasadores e outros controles de tensão como o controle por TAP de transformação.
6. Aceleração do GoCases por paralelismo em GPU e redução adaptativa do espaço amostral.
7. Expansão do GoCurvs para análises de curto prazo com resposta dinâmica via modelos diferenciais-algébricos.

8. Criação de interface web para integração direta com o SCADA, permitindo simulações em tempo real.

Referências

- [1] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Relatório Anual 2014**; https://www.ons.org.br/sites/multimidia/Documentos%20Compartilhados/relatorio_s%20anuais/RA2014_ONS/a-operação-do-sin.html. Acesso em: 3 jun. 2025.
- [3] KUNDUR, Prabha. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [5] BAPTISTA, Jacson Moura. **Simulador de Sistemas Elétricos de Potência – SimSEP**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2017.
- [4] WOOD, Allen J.; WOLLENBERG, Bruce F.; SHEBLÉ, Gerald B. **Power Generation, Operation, and Control**. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.
- [2] STEVENSON, William D. **Elements of Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1955.
- [9] IEEE/CIGRÉ Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “**Definition and Classification of Power System Stability**”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, 2004.
- [8] ARCOS, Raphael Bottino. **Elaboração de Heurística Evolutiva para Despacho na Geração**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2017.
- [6] COSTA, Igor Ferreira da. **Módulo de Curva de Carga para o SimSEP**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, RJ, 2018.
- [7] SILVA JUNIOR, Ayres Nishio da. **Algoritmo Evolutivo na Alocação de Planos de Medição**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, RJ, 2018.
- [10] SALGADO, Marcelo Nunes. **Análise de Fluxo de Carga: Técnica de Abordagem por Representação Polar, Retangular e por Injeção de Correntes**. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Brasília, 2013.
- [11] ZHAO, Jinquan; CHIANG, Hsiao-Dong; LI, Hua; JU, Ping. **On PV-PQ Bus Type Switching Logic in Power Flow Computation**. Nanjing, China: Hohai University; Ithaca, NY: Cornell University, 2008.

- [12] GARCIA, Emanoel Gecildo Albuquerque. *TCC — Fluxo de Potência com Controle de Reativo: Códigos-fonte e Simuladores em Python*. GitHub, 2025. Disponível em: <https://github.com/emanoeletricaUFF/TCC---Fluxo-de-Pot-ncia-com-controle-de-reactivo/tree/main>. Acesso em: 9 jul. 2025.

Apêndice A – Arquivos CDF

Este anexo apresenta a organização dos arquivos no formato CDF (Common Data Format) empregados nos estudos de estabilidade de tensão: ieee9_Marcelo.cdf, ieee14.cdf, ieee30.cdf e ieee118.cdf. Esses arquivos descrevem, de forma padronizada, a topologia, os parâmetros elétricos e os limites operativos dos sistemas teste do IEEE. A seguir, são detalhadas as principais seções – matrizSystem (dados de barras) e matrizSystem2 (dados de linhas) – ilustradas por meio de figuras esquemáticas.

matrizSystem		NB																									
índice da barra	nome da barra	tensão base	índice de barra		tipo de barra		tensão nominal (pu)		desfasagem angular (graus)		potência ativa de carga (MW)		potência reativa de carga (MVA)		potência ativa de geração (MW)		potência reativa de geração (MVA)		tensão base (V)		tensão especificada de controle (pu)		limite superior de geração de reativo (MVAr)		limite inferior de geração de reativo (MVAr)		shunt de barra (pu)
1	n	Vn_{base}	1	1	3	1.00	0.00	0.0	0.0	Pr _{ger}	Qn _{ger}	Vn _{base}	v _{nctrl}	Q _{max}	Q _{min}	0	B _{sh}	0	0	0	0	0	0	0			
2	t	Vt_{base}	1	1	0	1.06	0.00	0.0	0.0	Qt _{ger}	Vt _{base}	v _{tctrl}	Q _{max}	Q _{min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3	m	Vm_{base}	1	1	2	1.10	0.00	P _L	Q _L	Pm _{ger}	Qm _{ger}	Vm _{base}	vm _{ctrl}	Q _{max}	Q _{min}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

matrizSystem2		dim(matrizSystem2)																						
índice DE	índice PARA	resistência do elemento de ramo (pu)		resistência do elemento de ramo (pu)		susceptância shunt (pu)		TAP (pu)																
1	2	1	1	1	0	r _{1in}	x _{1in}	b _{1sh}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	1	1	1	0	r _{2in}	x _{2in}	b _{2sh}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	1	1	1	0	r _{1m}	x _{1m}	0	0	0	0	0	0	0	0	tap _{1m}	0	0	0	0	0	0	0	0

LEGENDA
NB N° DE BARRAS

Os estudos empregaram quatro sistemas testes: IEEE 9, 14, 30 e 118 Barras. O conteúdo integral de cada arquivo está disponível digitalmente no repositório público citado na Seção de Referências. Devido ao seu tamanho reduzido e importância nos testes realizados, os arquivos ieee9_Marcelo.cdf e ieee14.cdf são apresentados na íntegra neste anexo. Para evitar alongar excessivamente o volume impresso desta monografia, apenas um trecho ilustrativo dos arquivos ieee30.cdf e ieee118.cdf é mostrado nas seções A.3 e A4. O arquivo completo encontra-se no repositório digital disponibilizado, juntamente com scripts de execução.

A.1 Arquivo ieee9_Marcelo.cdf

```

12/10/24 UW ARCHIVE          100.0  1962 W IEEE 09 Bus Test Case
=====1=====2=====3=====4=====5=====6=====7=====8=====9=====
=====0=====1=====2=====3==
1234      NNNNNNNNNNNN   AAZZZ   TT   X.XXXX+XXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX      XXXX.XX
X.XXXX+XXX.XX+XXX.XX+XX.XXXX+XX.XXXX 1234 1234
BUS DATA FOLLOWS           14 ITEMS
  1 Bus 1    11kV  1  1  3 1.0000   0.00   0.00   0.00   71.95   0.00   0.00 1.0000
  0.00   0.00   0.0000   0.0000   0
  2 Bus 2    11kV  1  1  2 1.0000   9.67   0.00   0.00  163.00   0.00   0.00 1.0000
 50.00  -40.00   0.0000   0.0000   0
  3 Bus 3    11kV  1  1  2 1.0000   4.77   0.00   0.00   85.00   0.00   0.00 1.0000
 40.00   0.00   0.0000   0.0000   0
  4 Bus 4   132kV  1  1  0 0.9870  -2.41   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00 0.0000
 0.00   0.00   0.0000   0.0000   0
  5 Bus 5   132kV  1  1  0 0.9750  -4.02   90.00   30.00   0.00   0.00   0.00 0.0000
 0.00   0.00   0.0000   0.0000   0
  6 Bus 6   132kV  1  1  0 1.0030   1.93   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00 0.0000
 0.00   0.00   0.0000   0.0000   0
  7 Bus 7   132kV  1  1  0 0.9860   0.62  100.00   35.00   0.00   0.00   0.00 0.0000
 0.00   0.00   0.0000   0.0000   0
  8 Bus 8   132kV  1  1  0 0.9960   3.80   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00 0.0000
 0.00   0.00   0.0000   0.0000   0
  9 Bus 9   132kV  1  1  0 0.9580  -4.35  125.00   50.00   0.00   0.00   0.00 0.0000
 0.00   0.00   0.0000   0.0000   0
-999
=====1=====2=====3=====4=====5=====6=====7=====8=====9=====
=====0=====1=====2=====3==
1234 1234 AAZZZ C T+xx.xxxxxx+xx.xxxxxx xxx.xxxxxx 12345 12345 12345 1234 1 x.xxxx +xxx.xx
x.xxxx x.xxxx .xxxxx x.xxxx x.xxxx 1234
BRANCH DATA FOLLOWS          21 ITEMS
  1   4   1   1   1   0   0.000000   0.0576   0.00000   0   0   0   0   0   0   1.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  2   8   1   1   1   0   0.000000   0.0625   0.00000   0   0   0   0   0   0   1.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  3   6   1   1   1   0   0.000000   0.0586   0.00000   0   0   0   0   0   0   1.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  4   5   1   1   1   0   0.017   0.0920   0.158   0   0   0   0   0   0   0.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  4   9   1   1   1   0   0.01   0.08500   0.176   0   0   0   0   0   0   0.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  5   6   1   1   1   0   0.039   0.17   0.358   0   0   0   0   0   0   0.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  6   7   1   1   1   0   0.0119   0.1008   0.209   0   0   0   0   0   0   0.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  7   8   1   1   1   0   0.0085   0.072   0.149   0   0   0   0   0   0   0.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
  8   9   1   1   1   0   0.032   0.161   0.306   0   0   0   0   0   0   0.0000   0.00
  0.0000 0.0000 .00000   0.0000   0.0000
-999
LOSS ZONES FOLLOWS          1 ITEMS

```

1 IEEE 09 BUS
-99
INTERCHANGE DATA FOLLOWS 1 ITEMS
1 2 Bus 2 HV 0.0 999.99 IEEE09 IEEE 09 Bus Test Case
-9
TIE LINES FOLLOWS 0 ITEMS
-999
END OF DATA

A.2 Arquivo ieee14.cdf

```

08/19/93 UW ARCHIVE          100.0  1962 W IEEE 14 Bus Test Case
=====1=====2=====3=====4=====5=====6=====7=====8=====9=====
=====0=====1=====2=====3==
1234      NNNNNNNNNNNN   AAZZZ    TT   X.XXXX+XXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX      XXXX.XX
X.XXXX+XXX.XX+XXX.XX+XX.XXXX+XX.XXXX 1234 1234
BUS DATA FOLLOWS           14 ITEMS
 1 Bus 1 132kV 1 1 3 1.0600  0.00  0.00  0.00  232.39 -16.55  0.00 1.0600
 0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
 2 Bus 2 132kV 1 1 2 1.0450 -4.98  21.70  12.70  40.00  43.56  0.00 1.0450
50.00 -40.00  0.0000  0.0000  0
 3 Bus 3 132kV 1 1 2 1.0100 -12.73  94.20  19.00  0.00  25.08  0.00 1.0100
40.00  0.00  0.0000  0.0000  0
 4 Bus 4 132kV 1 1 0 1.0180 -10.31  47.80 -3.90  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
 5 Bus 5 132kV 1 1 0 1.0200 -8.77  7.60  1.60  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
 6 Bus 6 33kV 1 1 2 1.0700 -14.22  11.20  7.50  0.00  12.73  0.00 1.0700
24.00 -6.00  0.0000  0.0000  0
 7 Bus 7 MID 1 1 0 1.0620 -13.36  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
 8 Bus 8 11kV 1 1 2 1.0900 -13.36  0.00  0.00  0.00  17.62  0.00 1.0900
24.00 -6.00  0.0000  0.0000  0
 9 Bus 9 33kV 1 1 0 1.0560 -14.94  29.50  16.60  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.1900  0
10 Bus 10 33kV 1 1 0 1.0510 -15.10  9.00  5.80  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
11 Bus 11 33kV 1 1 0 1.0570 -14.79  3.50  1.80  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
12 Bus 12 33kV 1 1 0 1.0550 -15.08  6.10  1.60  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
13 Bus 13 33kV 1 1 0 1.0500 -15.16  13.50  5.80  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
14 Bus 14 33kV 1 1 0 1.0360 -16.03  14.90  5.00  0.00  0.00  0.00 0.0000
0.00  0.00  0.0000  0.0000  0
-999
=====1=====2=====3=====4=====5=====6=====7=====8=====9=====
=====0=====1=====2=====3==
1234 1234 AAZZZ C T+xx.xxxxxx+xx.xxxxxx xxx.xxxxxx 12345 12345 12345 1234 1 x.xxxx +xxx.xx
x.xxxx x.xxxx .xxxxx x.xxxx x.xxxx 1234
BRANCH DATA FOLLOWS           21 ITEMS
 1 2 1 1 0 0.019380  0.059170  0.05280  0  0  0  0  0  0.0000  0.00
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 1 5 1 1 0 0.054030  0.223040  0.04920  0  0  0  0  0  0.0000  0.00
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 2 3 1 1 0 0.046990  0.197970  0.04380  0  0  0  0  0  0.0000  0.00
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 2 4 1 1 0 0.058110  0.176320  0.03400  0  0  0  0  0  0.0000  0.00
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 2 5 1 1 0 0.056950  0.173880  0.03460  0  0  0  0  0  0.0000  0.00
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

```

3	4	1	1	1	0	0.067010	0.171030	0.01280	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
4	5	1	1	1	0	0.013350	0.042110	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
4	7	1	1	1	0	0.000000	0.209120	0.00000	0	0	0	0	0	0.9780	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
4	9	1	1	1	0	0.000000	0.556180	0.00000	0	0	0	0	0	0.9690	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
5	6	1	1	1	0	0.000000	0.252020	0.00000	0	0	0	0	0	0.9320	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
6	11	1	1	1	0	0.094980	0.198900	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
6	12	1	1	1	0	0.122910	0.255810	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
6	13	1	1	1	0	0.066150	0.130270	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
7	8	1	1	1	0	0.000000	0.176150	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
7	9	1	1	1	0	0.000000	0.110010	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
9	10	1	1	1	0	0.031810	0.084500	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
9	14	1	1	1	0	0.127110	0.270380	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
10	11	1	1	1	0	0.082050	0.192070	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
12	13	1	1	1	0	0.220920	0.199880	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											
13	14	1	1	1	0	0.170930	0.348020	0.00000	0	0	0	0	0	0.0000	0.00
0.0000	0.0000	.00000	0.0000	0.0000											

-999

LOSS ZONES FOLLOWS

1 ITEMS

1 IEEE 14 BUS

-99

INTERCHANGE DATA FOLLOWS

1 ITEMS

1 2 Bus 2 HV 0.0 999.99 IEEE14 IEEE 14 Bus Test Case

-9

TIE LINES FOLLOWS

0 ITEMS

-999

END OF DATA

A.3 Trecho inicial do arquivo ieee30.cdf

```

08/20/93 UW ARCHIVE          100.0  1961 W IEEE 30 Bus Test Case
=====1=====2=====3=====4=====5=====6=====7=====8=====9=====
=====0=====1=====2=====3==
1234      NNNNNNNNNNNN      AAZZZ     TT    X.XXXX+XXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX      XXXX.XX
X.XXXX+XXX.XX+XXX.XX+XX.XXXX+XX.XXXX 1234 1234

BUS DATA FOLLOWS
   1 Glen Lyn 132 1 1 3 1.060 0.0 25.0 0.0 260.2 -16.1 132.0 1.060
   0.0 0.0 0.0 0.0 0
   2 Claytor 132 1 1 2 1.043 -5.48 21.7 12.7 40.0 50.0 132.0 1.045
   50.0 -40.0 0.0 0.0 0
   3 Kumis 132 1 1 0 1.021 -7.96 2.4 1.2 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   4 Hancock 132 1 1 0 1.012 -9.62 7.6 1.6 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   5 Fieldale 132 1 1 2 1.010 -14.37 94.2 19.0 0.0 37.0 132.0 1.010
   40.0 -40.0 0.0 0.0 0
   6 Roanoke 132 1 1 0 1.010 -11.34 0.0 0.0 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   7 Blaine 132 1 1 0 1.002 -13.12 22.8 10.9 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   8 Reusens 132 1 1 2 1.010 -12.10 30.0 30.0 0.0 37.3 132.0 1.010
   40.0 -10.0 0.0 0.0 0
   9 Roanoke 1.0 1 1 0 1.051 -14.38 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   10 Roanoke 33 1 1 0 1.045 -15.97 5.8 2.0 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.19 0
   11 Roanoke 11 1 1 2 1.082 -14.39 0.0 0.0 0.0 0.0 16.2 11.0 1.082
   24.0 -6.0 0.0 0.0 0
   12 Hancock 33 1 1 0 1.057 -15.24 11.2 7.5 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   13 Hancock 11 1 1 2 1.071 -15.24 0.0 0.0 0.0 0.0 10.6 11.0 1.071
   24.0 -6.0 0.0 0.0 0
   14 Bus 14 33 1 1 0 1.042 -16.13 6.2 1.6 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   15 Bus 15 33 1 1 0 1.038 -16.22 8.2 2.5 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   16 Bus 16 33 1 1 0 1.045 -15.83 3.5 1.8 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   17 Bus 17 33 1 1 0 1.040 -16.14 9.0 5.8 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   18 Bus 18 33 1 1 0 1.028 -16.82 3.2 0.9 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   19 Bus 19 33 1 1 0 1.026 -17.00 9.5 3.4 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   20 Bus 20 33 1 1 0 1.030 -16.80 2.2 0.7 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0
   21 Bus 21 33 1 1 0 1.033 -16.42 17.5 11.2 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0
   0.0 0.0 0.0 0

```

A.4 Trecho inicial do arquivo ieee118.cdf

```

08/25/93 UW ARCHIVE          100.0  1961 W IEEE 118 Bus Test Case
=====1=====2=====3=====4=====5=====6=====7=====8=====9=====
=====0=====1=====2=====3==

1234      NNNNNNNNNNNN      AAZZZ     TT    X.XXXX+XXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX+XXXXXX.XX      XXXX.XX
X.XXXX+XXX.XX+XXX.XX+XX.XXXX+XX.XXXX 1234 1234

BUS DATA FOLLOWS

   1 Riversde  V2  1  1  2  0.955  10.67      51.0      27.0      0.0      0.0      0.0      0.955
15.0     -5.0  0.0  0.0      0
   2 Pokagon   V2  1  1  0  0.971  11.22      20.0      9.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
   3 HickryCk  V2  1  1  0  0.968  11.56      39.0      10.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
   4 NwCarls1  V2  1  1  2  0.998  15.28      30.0      12.0      -9.0      0.0      0.0      0.998
300.0    -300.0  0.0  0.0      0
   5 Olive     V2  1  1  0  1.002  15.73      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  -0.40     0
   6 Kankakee  V2  1  1  2  0.990  13.00      52.0      22.0      0.0      0.0      0.0      0.990
50.0     -13.0  0.0  0.0      0
   7 JacksnRd  V2  1  1  0  0.989  12.56      19.0      2.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
   8 Olive     V1  1  1  2  1.015  20.77      0.0      0.0      -28.0      0.0      0.0      1.015
300.0    -300.0  0.0  0.0      0
   9 Bequine   V1  1  1  0  1.043  28.02      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
  10 Breed     V1  1  1  2  1.050  35.61      0.0      0.0      450.0      0.0      0.0      1.050
200.0    -147.0  0.0  0.0      0
  11 SouthBnd  V2  1  1  0  0.985  12.72      70.0      23.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
  12 TwinBrch  V2  1  1  2  0.990  12.20      47.0      10.0      85.0      0.0      0.0      0.990
120.0    -35.0  0.0  0.0      0
  13 Concord   V2  1  1  0  0.968  11.35      34.0      16.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
  14 GoshenJt  V2  1  1  0  0.984  11.50      14.0      1.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
  15 FtWayne   V2  1  1  2  0.970  11.23      90.0      30.0      0.0      0.0      0.0      0.970
30.0     -10.0  0.0  0.0      0
  16 N. E.     V2  1  1  0  0.984  11.91      25.0      10.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
  17 Sorenson  V2  1  1  0  0.995  13.74      11.0      3.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
  18 McKinley  V2  1  1  2  0.973  11.53      60.0      34.0      0.0      0.0      0.0      0.973
50.0     -16.0  0.0  0.0      0
  19 Lincoln   V2  1  1  2  0.963  11.05      45.0      25.0      0.0      0.0      0.0      0.962
24.0     -8.0  0.0  0.0      0
  20 Adams     V2  1  1  0  0.958  11.93      18.0      3.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0
  21 Jay       V2  1  1  0  0.959  13.52      14.0      8.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.0      0.0  0.0      0

```


Apêndice B – Lista de algoritmos

1. **ALGORÍTMO 1:** Cálculo da matriz Jacobiana
2. **ALGORÍTMO 2:** Cálculo dos Mismatch de Potências
3. **ALGORÍTMO 2:** Verificações de limites operativos de geração de reativo.

ALGORÍTMO 1: Cálculo da matriz Jacobiana

Entrada:

- NPV : número de barras tipo PV.
- NPQ : número de barras tipo PQ.
- $Barras_PQ$: vetor com flags 'Y' indicando barras PQ.
- $MatrizG, MatrizB$: partes real e imaginária da Matriz Y.
- $Tensao/DeltaV$: vetor com valores de $|V|$ em cada barra.
- $Def_Ang/Delta\theta$: vetor com ângulos de tensão (em rad).

Processo:

1. Define:

- $num_Barras = NPQ + NPV + 1$
- $Barras_PQ_val = [\text{índices onde } Barras_PQ[k] == 'Y']$

2. Matriz H ($\partial P / \partial \theta$), dimensão: $(NPQ + NPV) \times (NPQ + NPV)$.

Para cada par de barras (k, f) :

- Se $k == f$:

$$H[k][f] = -V_k \times \sum_{m \neq k} [V_m (G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m))]$$

- Se $k \neq f$:

$$H[k][f] = -V_k \times V_f \times (G_{kf} \sin(\theta_k - \theta_f) - B_{kf} \cos(\theta_k - \theta_f))$$

3. Matriz N ($\partial P / \partial V$), dimensão: $(NPQ + NPV) \times NPQ$

Para cada par (k, f) onde f é PQ:

- Se $k == f$:

$$N[k][f] = -2 \times V_k \times G_{kk} - \sum_{m \neq k} [V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m))]$$

- Se $k \neq f$:

$$N[k][f] = -V_k \times (G_{kf} \cos(\theta_k - \theta_f) + B_{kf} \sin(\theta_k - \theta_f))$$

4. Matriz M ($\partial Q / \partial \theta$), dimensão: $NPQ \times (NPQ + NPV)$

Para cada par (k, f) onde f é PQ:

- Se $k == f$:

$$M[k][f] = -V_k \times \sum_{m \neq k} [V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m))]$$

- Se $k \neq f$:

$$M[k][f] = V_k \times V_f \times (G_{kf} \cos(\theta_k - \theta_f) + B_{kf} \sin(\theta_k - \theta_f))$$

5. Matriz L ($\partial Q / \partial V$), dimensão: $NPQ \times NPQ$

Para pares de barras PQ (k, f):

- Se $k == f$:

$$L[k][f] = 2 \times V_k \times B_{kk} + \sum_{m \neq k} [V_m \times (G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m))]$$

- Se $k \neq f$:

$$L[k][f] = -V_k \times (G_{kf} \sin(\theta_k - \theta_f) - B_{kf} \cos(\theta_k - \theta_f))$$

6. Junta as matrizes para formar a Jacobiana completa:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}$$

- Usa `np.concatenate()` para unir as submatrizes lado a lado.

7. Caso $NPQ == 0$:

- Jacobiana é apenas H (sem blocos reativos)

Saída:

- *MatrizJ*: matriz Jacobiana pronta para uso no método de Newton-Raphson.

ALGORÍTMO 2: Cálculo dos *Mismatch* de Potências

Entrada:

- *NB*: número total de barras do sistema.
- *Barras_PQ*: vetor com flags 'Y' para indicar se a barra é do tipo PQ.
- *matriz_DadosBarra*: matriz com dados organizados por colunas:
 - [1][k] = *P* carga (negativo)
 - [7][k] = *P* geração (positivo)
 - [2][k] = *Q* carga (negativo)
 - [4][k] = *Qmin* (usado se estiver violando limite inferior)
 - [5][k] = *Qmax* (usado se estiver violando limite superior)
 - [3][k] = 'Y' se houver controle de reativo (PV)
- *MatrizG*, *MatrizB*: partes real e imaginária da Matriz Y.
- *Tensao/DeltaV*: vetor com valores de |*V*| em cada barra.
- *Def_Ang/Deltaθ*: vetor com ângulos de tensão (em rad).
- *VerificaSeViola*: vetor com flags como 'ViolaPB' ou 'ViolaPC' ou 'N'

Processo:

1. Inicializa:

$$\begin{aligned} \textit{deltaP}[k] &= 0 \text{ para todas as barras} \\ \textit{deltaQ}[k] &= 0 \text{ para todas as barras} \end{aligned}$$

2. Para cada barra `k` de 0 até *NB*:

- Se `k == 0` (barra slack), define *deltaP[0]* = 0 e pula cálculo
- Caso contrário:
 - a. Calcula potência ativa líquida:

$$\textit{Pliq}[k] = \textit{Pcarga}[k] + \textit{Pger}[k]$$

- b. Calcula o somatório de injeção de potência ativa:

$$\begin{aligned} \textit{somaP} &= \sum_{\textit{aux}} \textit{V}_{\textit{aux}} \times (\textit{G} \cos(\theta_k - \theta_{\textit{aux}}) \\ &\quad + \textit{B} \sin(\theta_k - \theta_{\textit{aux}})) \end{aligned}$$

- c. Define o *mismatch* de P:

$$\textit{deltaP}[k] = \textit{Pliq}[k] - \textit{V}_k \times \textit{somaP}$$

3. Para potência reativa *deltaQ*:

- Se a barra `k` é PQ (*Barras_PQ*[k] == 'Y'):
 - a. Se a barra possui controle de Q (*matriz_DadosBarra*[3][k] == 'Y'):
 - Se está violando limite inferior (*VerificaSeViola*[k] = 'ViolaPB'):

$$\textit{Qliq}[k] = \textit{Qcarga}[k] + \textit{Qmin}[k]$$
 - Se está violando limite superior (*VerificaSeViola*[k] = 'ViolaPC'):

$$Qliq[k] = Qcarga[k] + Qmax[k]$$

b. Se **não** possui controle de Q:

$$Qliq[k] = Qcarga[k]$$

c. Em todos os casos acima:

$$\begin{aligned} somaQ &= \Sigma V_{aux} \times (G \sin(\theta_k - \theta_{aux}) \\ &\quad - B \cos(\theta_k - \theta_{aux})) \end{aligned}$$

$$deltaQ[k] = Qliq[k] - V_k \times somaQ$$

- Se a barra não for PQ (PV ou slack):

$$deltaQ[k] = 0$$

4. Cria lista final `DeltaPQ` com tamanho $2 \times NPQ + NPV$:

- As primeiras ($NPQ + NPV$) posições contêm os $deltaP[1:]$.
- As últimas NPQ posições contêm os $deltaQ$ apenas das barras PQ.

Saída:

- $deltaP$: vetor com mismatch de potência ativa por barra.
 - $deltaQ$: vetor com mismatch de potência reativa (apenas para PQ).
 - $deltaPQ$: vetor com mismatch de potência ativa e reativa para cálculo.
-

ALGORÍTMO 3: Verificações de limites operativos de geração de reativo.

