



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

WILLIAM CHAVES LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE EQUIVALENTES DE SISTEMAS
ELÉTRICOS PARA APLICAÇÃO EM ANAREDE**

Recife
2022

WILLIAM CHAVES LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE EQUIVALENTES DE SISTEMAS
ELÉTRICOS PARA APLICAÇÃO EM ANAREDE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador: Prof. Dr. Augusto César Cavalcanti de Oliveira

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz, CRB4/1361

L732d Lima, William Chaves.
Desenvolvimento de metodologias de equivalentes de sistemas elétricos para aplicação em ANAREDE /. – 2022.
120 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni.
Coorientador: Prof. Dr. Augusto César Cavalcanti de Oliveira.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento Engenharia Elétrica, Recife, 2022.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Elétrica. 2. Equivalentes de redes. 3. Grafos. 4. Método de Ward estendido. 5. ANAREDE. I. Simoni, Vicente Ribeiro (Orientador). II. Oliveira, Augusto César Cavalcanti de (Coorientador). III. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2022-341

WILLIAM CHAVES LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE EQUIVALENTES DE SISTEMAS
ELÉTRICOS PARA APLICAÇÃO EM ANAREDE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica

Aprovado em: 24/05/2022

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Augusto César Cavalcanti de Oliveira (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Roberto Feliciano Dias
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Geraldo Leite Torres
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho às pessoas que, assim como eu, realizam os passos de suas trajetórias com fins neles mesmos.

AGRADECIMENTOS

O que há de mais belo na gratidão é a humildade de reconhecer que tudo o que construímos na vida depende também das pessoas com quem vivemos. A humildade de reconhecer as nossas limitações individuais e a importância das outras pessoas. A humildade de se perguntar o que seria diferente se não fosse a presença de certas pessoas. Teria sido possível alcançar o destino presente? Teria sido possível alcançar os objetivos? Talvez..., mas certamente o caminho para isso seria diferente. Portanto, se o lugar a que cheguei me agrada e o caminho também, só me resta agradecer. Entretanto, eu não poderia aqui listar tudo pelo que sou grato às pessoas que citarei, do contrário escreveria um trabalho a parte, sendo assim busquei reconhecer as pessoas sem as quais certamente meus resultados e caminhos seriam diferentes.

Agradeço o esforço e dedicação de todos os que foram meus professores, nas incontáveis horas de sala de aula. Sem essas pessoas estaríamos todos perdidos num mundo vasto de informação e conhecimento, ainda mais na área da Engenharia Elétrica. Dentre meus professores, agradeço especialmente: ao professor Vicente, por ter enxergado em mim uma pessoa capaz de resolver o problema que motiva este trabalho; ao professor Augusto por todo o apoio, confiança e estímulo ao meu desenvolvimento acadêmico; ao professor Geraldo pela oportunidade de ter sido seu monitor, quando muito aprendi sobre teoria de grafos; e ao professor Luiz Magnata, grande mentor com quem aprendi circuitos, tendo sido constantemente instigado pelos seus desafiadores problemas propostos.

Agradeço também aos colegas que estiveram comigo ao longo da graduação. Essa jornada teria sido muito mais difícil se tivesse sido mais solitária, uma vez que a interação também é grande estímulo para o desenvolvimento das atividades acadêmicas, além de proporcionar muitos aprendizados. Na maioria das vezes fui considerado pelos amigos e amigas como uma referência, alguém a ser procurado na hora de estudar e agradeço muito por isso, pois passei a ter ainda mais motivações para saber.

Agradeço a Alecio pelo apoio, paciência e por ter me concedido acesso a uma versão completa do ANAREDE, o que muito me ajudou no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço especialmente a uma pessoa cujo apoio me foi fundamental, não só ao longo do desenvolvimento deste trabalho, mas ao longo de toda a caminhada da minha vida, desde o início de minha existência. Ela que me ensinou a ser o que me tornei e a buscar a minha originalidade. Ela que me estimulou desde cedo a gostar dos estudos, a aprender a pensar e refletir. Ela que tanto se esforçou para que eu pudesse me concentrar no meu desenvolvimento acadêmico. Muito obrigado, mãe!

RESUMO

A ferramenta de equivalentes de rede do ANAREDE, embora esteja associada a uma flexível linguagem de seleção de barras, é de difícil uso para obtenção de redes equivalentes conexas, em especial, de redes pequenas com relação ao tamanho do SIN. Mesmo quando é possível obter a rede desejada, é exigido bastante cuidado por parte do usuário para seleção correta das regiões do equivalente. Para contornar essas dificuldades, este trabalho visa desenvolver um novo método de seleção de barras, via teoria de grafos, o qual possibilite a obtenção de redes reduzidas conexas e de qualquer tamanho e, além disso, que facilite a entrada fornecida pelo usuário, utilizando para esse desenvolvimento uma implementação externa com o MATLAB. Essa implementação é adaptada à ferramenta já existente prosseguindo-se, por meio dela, à aplicação do método de Ward estendido. Com vistas a entender esse método e a sua adequação ao propósito do trabalho, a teoria de circuitos equivalentes é explorada na fundamentação teórica, de maneira a abordar desde as técnicas analógicas de equivalentes, desenvolvidas para analisadores de rede, até as computacionais. Além disso, para compreender o funcionamento da ferramenta, à luz da teoria estudada, foram analisadas de forma isolada as situações problema que se interpunham ao alcance dos objetivos, tendo sido propostas as adaptações necessárias. A aplicação da nova metodologia, por exemplo, possibilita reduzir a rede completa, com cerca de 10500 barras, para uma rede com apenas 120 barras cujos resultados de simulação de fluxo de potência sejam concordantes com os da rede original. Resultados como esse abrem espaço para discussão sobre os limites e benefícios da utilização de equivalentes de rede em estudos de fluxo de potência e, além disso, podem contribuir para outras aplicações nas quais é necessário o uso de redes equivalentes, como transitórios eletromagnéticos.

Palavras-chave: equivalentes de redes; grafos; método de Ward estendido; ANAREDE.

ABSTRACT

The equivalent network tool from ANAREDE, although associated to a very flexible bus selection language, is hard to use in order to obtain connected equivalent networks, especially when compared to the SIN total size. Even when it is possible to obtain the desired network, it is necessary a very careful approach by the user to correctly select the equivalent regions. To circumvent these difficulties, this work aims to develop a new method of bus selection, via graph theory with a MATLAB implementation, which makes possible to obtain connected equivalent networks of any size and, furthermore, which makes the user input easier. This implementation is adapted to the existing tool, by means of which is applied the extended Ward's method for network reduction. To better understand this method and its adequacy to the objectives of this work, equivalent circuits theory is explored, since the first analogical equivalent techniques, which were developed for network analyzers, up to the computational ones. Furthermore, to better understand the tool itself, in the light of the studied theory, the problems which impaired the achievement of the objectives were each isolated on smaller case-studies for the proposition of the necessary adaptations. By applying this new methodology, one can, for instance, reduce a network with about 10500 buses to one with just 120 whose power flux simulation results are compatible with the ones obtained with the complete network. Results like these make room to discussions about the limits and benefits of using equivalent networks on power flow studies and can also contribute to other study fields to which the use of equivalents is necessary, such as electromagnetic transients.

Keywords: equivalent networks; graphs; extended Ward's method; ANAREDE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da ferramenta de equivalentes de rede	16
Figura 2 – Composição de uma frase lógica	16
Figura 3 – Exemplo de utilização da ferramenta equivalentes de redes	17
Figura 4 – Opções da ferramenta equivalentes de redes.....	18
Figura 5 – Uso da barra de pesquisa	19
Figura 6 – Representação genérica de um sistema dividido em regiões	26
Figura 7 – Circuito para obtenção do equivalente da rede externa	27
Figura 8 – Montagem para obtenção das impedâncias equivalentes.....	28
Figura 9 – Malha equivalente da rede externa	29
Figura 10 – Rede de $n+1$ terminais e n portas	31
Figura 11 – Convenção de sinais	41
Figura 12 – Modelo pi de linhas de transmissão	42
Figura 13 – Modelo de transformador	42
Figura 14 – Modelo unificado de um ramo do sistema elétrico	43
Figura 15 – Região de interesse	52
Figura 16 – Equivalente de Ward estendido	55
Figura 17 – Grafo exemplo.....	57
Figura 18 – Estrutura de adjacência do grafo exemplo	58
Figura 19 – Cartão EXEQ do exemplo inicial	62
Figura 20 – Entorno da barra 7057 antes e depois da obtenção do equivalente	62
Figura 21 – Rede IEEE14	64
Figura 22 – Rede IEEE114 reduzida sem opção FINT	65
Figura 23 – Rede IEEE14 reduzida com opção FINT	66
Figura 24 – 9 ilhas com apenas uma barra	68
Figura 25 – rede IEEE14 reduzida com a opção PCTE	69
Figura 26 – rede IEEE14 reduzida com as opções PCTE e FINT.....	70
Figura 27 – exemplo IEEE14 modificado com duas ilhas	71
Figura 28 – Resultado da redução da área 1 na rede IEEE14 modificada.....	72
Figura 29 – Resultado da eliminação da área 2 na rede IEE14 modificada.....	73
Figura 30 – Eliminação de todas as áreas exceto a 741	75
Figura 31 – Mensagem de erro	76
Figura 32 – Grafo completo da rede elétrica	81

Figura 33 – grafo do conjunto conexo de 120 barras centrado em JOAIRA-PE230	.82
Figura 34 – Grafo da rede elétrica colorido	83
Figura 35 – Rede reduzida colorida	84
Figura 36 – Cartão DCRE gerado pelo MATLAB	86
Figura 37 – Cartão para aparar os excessos	87
Figura 38 – Divisão da rede em regiões para redução	89
Figura 39 – Cartão para montar grupos de agregadores	90
Figura 40 – Função Egrede	91
Figura 41 – Parte da saída da função busca por nível para o exemplo de Joairam	94
Figura 42 – Caso base íntegro	116
Figura 43 – Caso reduzido íntegro	117
Figura 44 – Caso base contingência 1	118
Figura 45 – Caso reduzido contingência 1	119
Figura 46 – Caso base contingência 2	120
Figura 47 – Caso reduzido contingência 2	121

LISTA DE SIGLAS

ANAFAS	Programa de Análise de Falhas Simultâneas
ANAREDE	Programa de Análise de Redes Elétricas
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
PEL	Plano de Operação Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

V_x	Tensão do nó x
I_x	Injeção de corrente no nó x
Z_{xk}	Impedância entre os nós x e k
R_{ij}	Cofator da linha i e coluna j
Z_{ij}	Elemento da linha i e coluna j da matriz impedância
Ω_k	Conjunto de todas as barras vizinhas à barra k
π	Letra grega pi
t	Tap do transformador
y_{km}	Admitância série entre as barras k e m
θ_{km}	Abertura angular da tensão da barra k em relação à da barra m
φ_{km}	Defasagem do transformador entre as barras k e m .
P_k	Injeção de potência ativa na barra k
Q_k	Injeção de potência reativa na barra k
\vec{I}_{km}	Corrente entre as barras k e m
\vec{E}_k	Tensão complexa na barra k
K	Conjunto de todas as barras vizinhas à barra k incluindo ela própria
Y_{FFeq}	Submatriz admitância que representa as ligações entre as barras de fronteira do sistema equivalente
Y_{FE}	Submatriz que relaciona os elementos externos aos da fronteira
Y_{EE}	Submatriz que relaciona os elementos externos entre si
U_{EE}	Resultado da redução de Gauss de Y_{EE}
Y_{FI}	Submatriz que relaciona os elementos internos aos da fronteira
Y_{II}	Submatriz que relaciona os elementos internos entre si

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	MOTIVAÇÃO	20
1.3	OBJETIVO GERAL	20
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	23
2.2	MÉTODO DOS EQUIVALENTES DE WARD	26
2.3	MODELAGEM DE SISTEMAS ELÉTRICOS	38
2.4	ABORDAGEM MATRICIAL E MÉTODOS DE WARD ESTENDIDO	50
2.5	GRAFOS: ALGORÍTMOS DE BUSCA	56
3	INVESTIGAÇÃO DAS SITUAÇÕES PROBLEMA.....	61
3.1	RETENÇÃO DE BARRAS DA REDE EXTERNA	61
3.2	FORMAÇÃO DE ILHAMENTOS NA REDE INTERNA	67
3.3	ERROS DE EXECUÇÃO.....	75
4	ADAPTAÇÕES METODOLÓGICAS PARA CONTORNO DOS PROBLEMAS.....	77
4.1	PROPOSIÇÃO DE NOVO MÉTODO DE SELEÇÃO DE BARRAS.....	77
4.2	TRATAMENTO PRÉ-EQUIVALENTE	85
4.3	SUBDIVISÃO DA REDE PARA REDUÇÃO EM ETAPAS.....	87
4.4	PASSO-A-PASSO E CRIAÇÃO DA FUNÇÃO PRINCIPAL.....	90
4.5	ALTERNATIVA DE IMPLEMENTAÇÃO: BUSCA POR NÍVEL.....	92
5	VERIFICAÇÃO BÁSICA DA METODOLOGIA IMPLEMENTADA.....	95
6	CONCLUSÕES	96
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99
	APÊNDICE A – FUNÇÃO PARA OBTER O GRAFO DE UMA REDE	101
	APÊNDICE B – FUNÇÃO PARA COLORIR O GRAFO DE UMA REDE	104
	APÊNDICE C – FUNÇÃO PARA ELIMINAÇÃO DE ELOS CC	106
	APÊNDICE D – FUNÇÃO PARA REMOÇÃO DE BARRAS	

INDESEJADAS	107
APÊNDICE E – FUNÇÃO PARA ELABORAÇÃO DOS GRUPOS DE AGREGADORES.....	108
APÊNDICE F – FUNÇÃO PARA OBTENÇÃO DO NÚMERO DA BARRA A PARTIR DO NOME	110
APÊNDICE G – FUNÇÃO PARA OBTENÇÃO DA ESTRUTURA DE ADJACÊNCIA DE UM GRAFO.....	111
APÊNDICE H – FUNÇÃO DE BUSCA EM LARGURA COM OPÇÃO DE NÍVEL	114
APÊNDICE I – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPARATIVAS DE FLUXO DE POTÊNCIA	116

1 INTRODUÇÃO

O cálculo de equivalentes de circuitos elétricos é uma ubíqua estratégia de simplificação de análise de circuitos no contexto da Engenharia Elétrica, com importância teórica desde os mais elementares desenvolvimentos de teoria de circuitos até as mais elaboradas teorias de cálculo de faltas, fluxo de potência, proteção de sistemas e transitórios eletromagnéticos. Como se sabe, essa valiosa ferramenta permite que se foque a análise em uma parte do circuito, modelando o restante por um circuito mais simples de comportamento análogo, o que além de representar um grande benefício teórico, representa também, a princípio, um valioso benefício computacional, principalmente ao lidar com circuitos de elevado número de barras, ou seja, com redes elétricas reais. Entretanto, a rapidez e robustez dos recursos computacionais modernos permite, por exemplo, que simulações de fluxo de potência e cálculo de faltas em sistemas extensos, como o brasileiro, com cerca de 10500 barras e 14100 ramos, sejam feitas em segundos, de modo a não ser essencial, para as análises de regime permanente, a simplificação prévia do circuito.

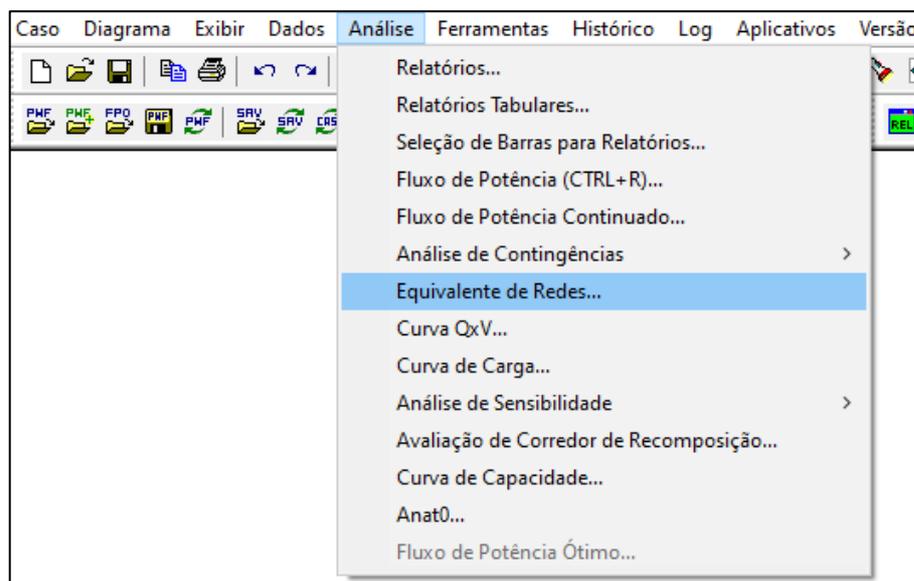
Por outro lado, para aplicações em transitórios eletromagnéticos, utilizando programas como o *Alternative Transients Program* (ATP), por exemplo, é necessário que seja feito um equivalente do circuito no entorno da região de interesse, por conta do maior esforço computacional requerido por esse tipo de simulação. Portanto, é importante que nos programas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), para os quais há extensas bases de dados e casos de estudo oficiais do Sistema Interligado Nacional (SIN), distribuídos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), existam ferramentas de cálculo de equivalentes, tais como existem no Programa de Análise de Redes Elétricas (ANAREDE) e no Programa de Análise de Faltas Simultâneas (ANAFAS). Entretanto, especificamente no primeiro programa, o correto funcionamento da ferramenta, resultando na obtenção de uma rede equivalente livre de ilhamentos desprovidos de barras de referência, em alguns casos fica comprometido, a depender das regiões selecionadas para eliminação e retenção no equivalente, de como é realizada tal seleção de barras e das opções escolhidas para execução do programa. Sendo assim, este trabalho visa estudar o funcionamento da ferramenta de análise de Equivalente de Redes do ANAREDE, analisando os casos

com resultados inadequados para identificação das causas e ainda, propor uma nova metodologia de seleção de barras que dependa menos da entrada do usuário.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

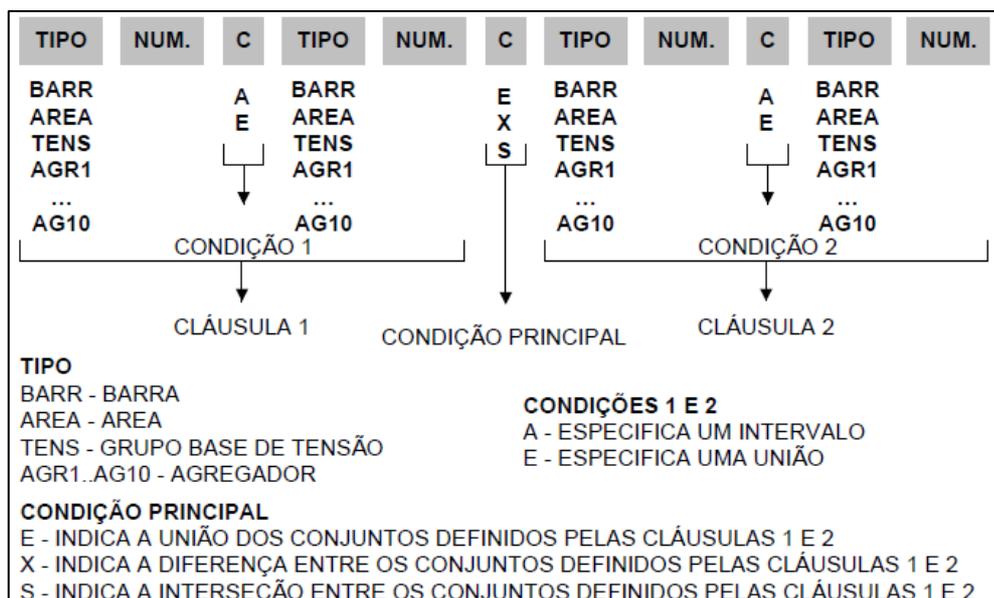
A seguir, apresenta-se de forma sucinta como utilizar a ferramenta de equivalentes do ANAREDE e quais são alguns dos problemas a serem resolvidos. A

Figura 1 – Localização da ferramenta de equivalentes de rede



Fonte: O autor (2022)

Figura 2 – Composição de uma frase lógica



Fonte: Manual do ANAREDE V11.05 (CEPEL, 2021, Apêndice A)

Figura 1 indica como acessar, na interface do programa, a ferramenta, cujo uso requer simulação prévia do fluxo de potência do caso carregado na memória.

A execução de comandos e a entrada de dados para o ANAREDE são realizadas por meio de estruturas com sintaxe bem definida, comumente denominadas de cartões. Ao abrir a ferramenta, pode-se montar de maneira interativa o conteúdo do cartão do Código de Execução de Equivalentes de Redes (EXEQ), cuja

Figura 3 – Exemplo de utilização da ferramenta equivalentes de redes

Equivalente de Redes (EXEQ)

Operação:

Tipo: Número: Nome:

Condição:

Tipo: Número: Nome:

Condição Principal:

Tipo: Número: Nome:

Condição:

Tipo: Número: Nome:

Inserir

Alterar

Remover

```
ELIM AREA 101 A AREA 212
ELIM AREA 213 A AREA 256 X TENS 500
ELIM AREA 257 A AREA 303 S TENS 345 E TENS 440
```

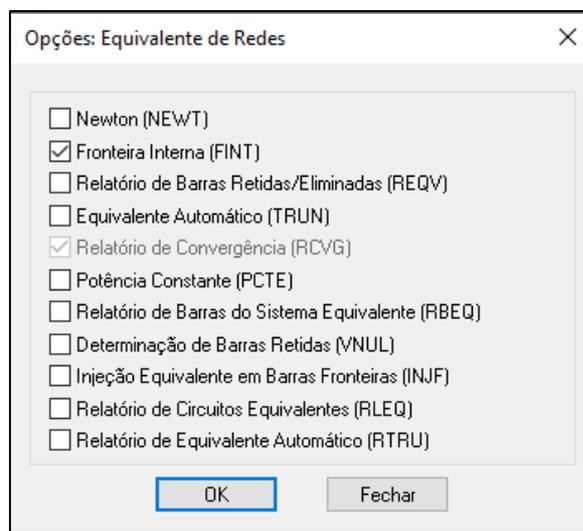
Aceitar Opções... Fechar

Fonte: O autor (2022)

função é obter o equivalente da rede externa de acordo com o definido por um conjunto de cláusulas lógicas que relacionam barras, áreas, grupos de tensão, ou agregadores, os quais são grupos de barras que podem ser definidos pelo usuário. Os casos de estudo do ONS não possuem grupos de agregadores predefinidos, tais como as áreas e os grupos base de tensão, de modo que, a princípio, não há a opção de escolha de regiões por agregadores. Somente após adicionar as definições desses grupos no arquivo de dados, é possível selecionar barras utilizando esses grupamentos. Nessa linguagem de seleção, cada linha de código é formada por, no máximo, duas cláusulas relacionadas por uma condição de união, diferença ou interseção e cada cláusula relaciona um dado conjunto por condições de união ou intervalo (CEPEL, 2021, Apêndice A). A Figura 2 apresenta esquematicamente a

linguagem de seleção e a Figura 3 mostra, na interface da ferramenta, três exemplos de frases lógicas, evidenciando as diferentes possibilidades de tamanho da frase a depender da quantidade de condições escolhidas. No primeiro, o mais simples, eliminam-se as barras das áreas 101 a 212; no segundo, eliminam-se as áreas 213 a 256, exceto as barras de nível de tensão 500kV; e no terceiro, eliminam-se as barras com nível de tensão 345kV e 440kV que estão contidas no intervalo da área 257 a 303.

Figura 4 – Opções da ferramenta equivalentes de redes



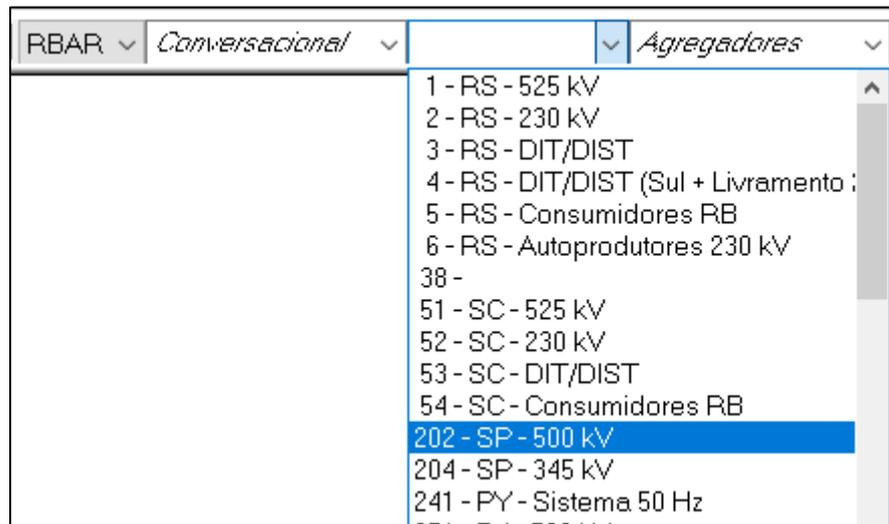
Fonte: O autor (2022)

Adicionalmente, na janela de opções, seleciona-se a opção fronteira interna (FINT), tal como mostra a Figura 4, para que as barras de fronteira entre as regiões eliminada e retida sejam barras da região escolhida para retenção. Ao clicar em aceitar, os conjuntos estabelecidos nas três frases serão eliminados. Conforme exemplificado, a linguagem de seleção é bastante flexível, mas nem sempre o resultado é exatamente conforme esperado. Por exemplo, para as condições citadas, simuladas a partir um caso de referência do ONS dos estudos do Plano de Ampliações e Reforços e do Plano de Operação Elétrica (PAR/PEL) 2022-2026 Verão 2022/2023 Leve (rev. final), esperava-se que todas as barras das áreas 202 e 204 fossem removidas, de acordo com a primeira condição, mas uma barra de cada uma dessas áreas permaneceu, o que pôde ser verificado com o auxílio da ferramenta de busca, conforme mostra a Figura 5. A princípio, isso não é um problema, mas indica que o programa identificou a necessidade de manter essas barras, quando esse fato não foi

percebido previamente pelo usuário no momento da escolha das barras a eliminar.

É interessante observar que, ao simular a rede resultante nesse caso, o programa retorna um erro de ilha elétrica sem barra de referência, o que é prontamente explicado pela eliminação acidental da barra de Ilha Solteira, presente na área 203. Isso requer que seja escolhida outra barra de referência dentre as retidas, o que também não é problema. Entretanto, em algumas situações, pode ocorrer que o circuito retido seja composto de várias ilhas sem barras de referência, de modo que não é conveniente estabelecer uma barra de referência para cada um dos ilhamentos indesejados, nem tampouco retirá-los manualmente, a fim de conseguir a simulação de fluxo somente com a parte de interesse.

Figura 5 – Uso da barra de pesquisa



Fonte: O autor (2022)

Em outros casos, quando a quantidade de barras para eliminação é muito elevada, a ferramenta para de funcionar e o programa fecha. Essas situações mostram que o bom funcionamento da ferramenta e a qualidade dos resultados obtidos, se a rede resultante está adequada para simulação, por exemplo, dependem bastante da entrada do usuário. Outra observação é a de que, embora a linguagem de seleção permita uma delimitação precisa das barras eliminadas, é inconveniente adicionar várias frases lógicas para escolha da parte eliminada caso muitas dessas sentenças sejam necessárias à delimitação da região de interesse e ao contorno de eventuais problemas como os mostrados.

1.2 MOTIVAÇÃO

Por si só, as dificuldades apresentadas para o uso da ferramenta de equivalentes já motivariam investigações sobre as causas dos problemas e como evitá-los, mas a motivação principal deste trabalho é a de conseguir utilizar a ferramenta para redução de casos do SIN a tamanhos compatíveis com o uso na versão estudante do programa, ou seja, com no máximo 120 barras, possibilitando que grande parte dos alunos que não têm acesso à versão completa possa realizar com maior facilidade estudos em situações reais como parte de trabalhos de conclusão de curso, por exemplo. É muito enriquecedor que os alunos possam, ainda no âmbito da graduação, ter acesso a esses estudos para desenvolver familiaridade com o setor elétrico, suas dinâmicas, seus desafios e as especificidades e problemas das redes de interesse, justamente para aplicar os conhecimentos teóricos na análise de problemas reais.

Essa oportunidade permite uma melhor integração entre os conhecimentos de várias disciplinas, uma vez que se pode estudar combinadamente aspectos de fluxo de potência e curto-circuito em uma mesma rede e numa rede real, realizando práticas de engenharia tais como análise de superação de barramentos e análise de contingências, ao invés de utilizar casos genéricos isoladamente em cada disciplina para aplicação direta da teoria sem discutir de maneira mais holística as complexidades envolvidas nesses estudos. Inclusive, o uso de casos do SIN possibilita também a utilização dos comentários e análises do próprio ONS, fomentando conhecimento sobre o setor elétrico brasileiro.

Foi ao tentar utilizar a ferramenta de equivalentes para esses propósitos que as dificuldades foram encontradas, ficando evidente também que tal ferramenta não foi pensada para essa finalidade, uma vez que, para conseguir selecionar uma região com tão pequeno número de barras em comparação com o total do sistema, ou mesmo com o número de barras em uma área, ou em um determinado nível de tensão, de forma geral, seria necessário o uso de várias frases lógicas e uma observação minuciosa da região de interesse a fim de evitar erros por parte do usuário.

1.3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa, portanto, viabilizar o uso da ferramenta de equivalentes de rede do ANAREDE para obtenção de redes reduzidas, com, no máximo, 120 barras.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo principal, será interessante atender a alguns objetivos específicos, dentre eles:

- Investigar o funcionamento da ferramenta para entender as causas dos erros;
- Elaborar nova metodologia de seleção de barras que seja menos dependente da entrada do usuário; e
- Generalizar essa metodologia para que possibilite também outras aplicações além da principal.

A nova metodologia de seleção é voltada para a finalidade deste trabalho, levando em consideração que, para obter a rede reduzida de 120 barras, o que se almeja é escolher um conjunto de barras, cuja rede seja livre de ilhamentos, no entorno de uma dada barra de interesse para o estudo. Desse modo, a entrada do usuário nessa nova proposta seria apenas a identificação dessa barra e o número de barras do equivalente, ou algum outro parâmetro que informe sobre a extensão do conjunto, como por exemplo até que vizinhança da barra de interesse será retida. É importante ressaltar que a implementação dessa nova abordagem será feita de maneira mais generalizada, de tal forma a possibilitar também outras aplicações.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Antes de propor o novo método de seleção de barras, ou mesmo de apresentar em mais detalhes as dificuldades encontradas para uso da ferramenta já existente, é importante introduzir a teoria de equivalentes de redes, a fim de que se possa entender de fato os métodos utilizados. Isso é feito no Capítulo 2, com uma seção introdutória sobre o contexto histórico e as primeiras metodologias de equivalentes, utilizadas na primeira metade do século XX, e, nas seções seguintes, com uma apresentação do método dos equivalentes de Ward tanto em sua versão original, como na estendida. Também na fundamentação, aborda-se um pouco de teoria de grafos, com a apresentação dos algoritmos de busca em profundidade e

busca em largura.

Com base nessas teorias, os capítulos seguintes se concentram no desenvolvimento das metodologias propostas. No Capítulo 3, investigam-se as situações problema que se interpõem ao alcance dos objetivos pretendidos, algumas das quais já foram introduzidas, e, no Capítulo 4, desenvolvem-se as soluções a esses problemas, com a proposição do novo método de seleção de barras e das adaptações necessárias para utilizá-lo em conjunto com a ferramenta do ANAREDE. Após o êxito na obtenção de uma metodologia generalizada para redução de redes a partir do novo método de seleção proposto, no Capítulo 5, é realizada uma breve comparação entre os resultados de simulações de fluxo de potência obtidos com o caso original e com o caso reduzido. Por fim, no Capítulo 6, são feitas as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

Do ponto de vista moderno, no contexto de estudos de planejamento e operação de sistemas elétricos, as metodologias de equivalentes de rede podem parecer apenas ferramentas auxiliares, dada a facilidade computacional de simular programas de fluxo de potência para redes extensas, conforme já comentado. Entretanto, a própria existência dessas metodologias e a importância teórica delas denota que, há não muito tempo atrás, a redução dos sistemas elétricos, cuja complexidade vinha aumentando progressivamente, era uma necessidade. Antes da existência de computadores como os conhecemos atualmente, capazes de determinar o estado de redes com milhares de barras e ramos em alguns segundos, esse processo de simulação era realizado por meio dos chamados analisadores de rede (*network analyzers*), os quais eram, basicamente, circuitos físicos em escala menor da rede elétrica a ser analisada, utilizados desde 1929, com a conclusão do desenvolvimento do primeiro analisador de rede de uso comercial, realizada por um grupo de pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em parceria com engenheiros da *General Electric* (HUGHES, 1993. p. 376), até meados da década de 1960.

Na década de 1920, os sistemas elétricos regionais nos Estados Unidos e na Europa passaram por um processo de acentuada expansão, tanto no que diz respeito à diversificação das fontes de geração, quanto no que diz respeito à construção de mais longas linhas de transmissão, possibilitada pela consolidação dos sistemas de alta tensão, e interligação de redes anteriormente separadas, o que trouxe mais flexibilidade operativa e confiabilidade. Essa crescente complexidade do sistema, aliada aos estímulos ao consumo de energia elétrica, que também impulsionaram tal expansão, tornou necessário o desenvolvimento de soluções de engenharia para lidar com as variações de carga do sistema, mantendo a estabilidade e garantindo atendimento em tempo real. Esses desafios estimularam o desenvolvimento de práticas, hoje rotineiras no âmbito do setor elétrico e fundamentais para seu funcionamento, tais como (HUGUES, 1993, p.363-376):

- O controle minucioso do despacho, utilizando critérios econômicos e combinando adequadamente os recursos hídricos e térmicos disponíveis a fim de evitar escassez de energia motivada pela sazonalidade de uma determinada fonte, como a hídrica por exemplo, e, ao mesmo tempo, a fim de operar com mínimo custo global, evitando uso excessivo de fontes mais caras, como as térmicas;
- A previsão de carga, embasada tanto em informações de crescimento da industrialização e registros históricos de curvas de carga, quanto em informações geográficas, climáticas e socioculturais relacionadas ao consumo energético por parte da população;
- O monitoramento constante da frequência do sistema, a qual passou a ser padronizada, visando manter a estabilidade e evitar perda de sincronismo das máquinas; e
- A utilização de redes de comunicação e armazenamento dos dados, as quais possibilitam o desenvolvimento das práticas anteriormente citadas e a integração entre elas.

É nesse contexto de desenvolvimento que também surgiram significativos desafios, além dos já citados, com relação à modelagem dos sistemas elétricos e sua descrição por meio de equações, o que é de primordial importância para a realização de análises de fluxo de potência, estabilidade e curto-circuito. Os problemas matemáticos não lineares decorrentes dessa modelagem eram de trabalhosa solução analítica e, em casos mais complexos, estavam além do alcance dos métodos de cálculo da época, praticamente manuais e apenas auxiliados por calculadoras de mesa mecânicas. Para contornar essas dificuldades que se interpunham ao uso das metodologias adotadas até então, e evitar que o desenvolvimento e bom planejamento do sistema ficassem prejudicados, métodos alternativos tiveram que ser desenvolvidos.

Num mundo que ainda desconhecia a rapidez moderna do computador digital, o poder da analogia era ainda mais forte nas mentes dos engenheiros e cientistas. Tanto que foram criados os já apresentados analisadores de rede, também chamados de calculadores de rede (*network calculators*) ou bancadas de cálculo AC (*ac calculating boards*), os quais eram verdadeiros computadores analógicos que

permitiram a simulação em escala de redes reais, por meio de pequenas máquinas, transformadores, resistores variáveis, linhas artificiais e outros equipamentos. O grupo de engenharia elétrica do MIT, liderado pelo famoso professor Vannevar Bush, além de ter criado o primeiro desses simuladores, desenvolveu também um outro equipamento, chamado de analisador diferencial (*differential analyzer*), voltado para a resolução de equações diferenciais. Esse outro equipamento, embora criado para auxiliar na resolução dos problemas da engenharia elétrica, encontrou diversas aplicações também em outras áreas e pode ser considerado como um dos precursores dos computadores digitais. (HUGUES, 1993; TYMPAS, 2007, p.68-72).

Outro engenheiro importante por suas muitas vezes controversas contribuições à engenharia elétrica e outras áreas, nessa época, foi Gabriel Kron. Utilizando analisadores de rede, ele desenvolveu metodologias para resolução de equações diferenciais a partir de circuitos equivalentes e fomentou o uso desses equipamentos em aplicações na mecânica dos fluidos, na mecânica quântica, e até mesmo na física nuclear, propondo analogias entre circuitos elétricos de potência e as reações químicas que ocorrem num reator nuclear (TYMPAS, 2007).

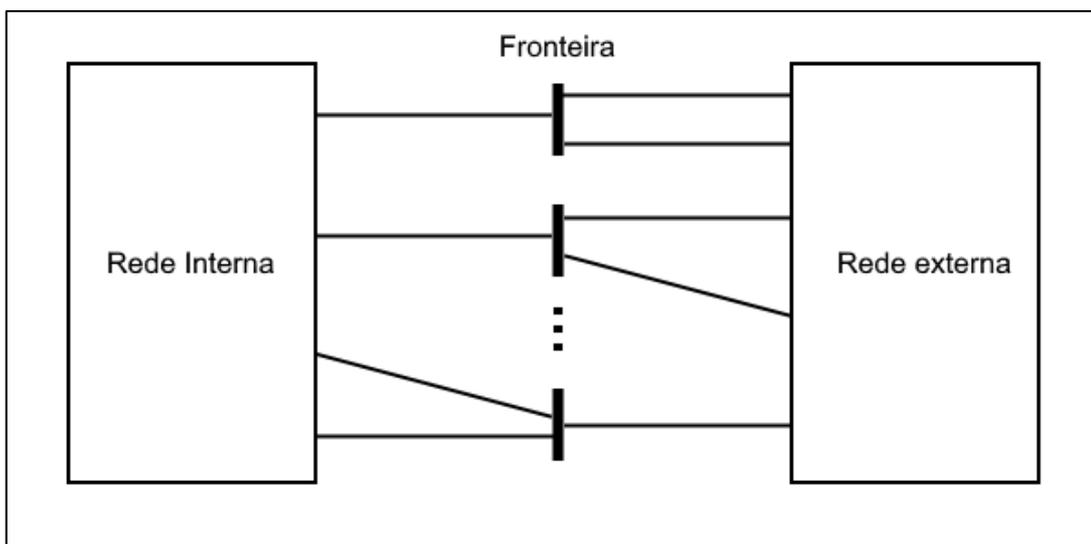
É interessante observar que o desenvolvimento dos analisadores de rede veio acompanhado da necessidade de aplicação de teorias de equivalentes, dada a clara limitação física, pelo número de componentes disponíveis, que as bancadas de simulação apresentavam. Como exemplo, o analisador original, desenvolvido pelo MIT, continha três estações de geração, duzentas milhas de linhas artificiais e 6 centros de cargas, o conjunto ocupando um espaço de uma sala de 50 pés quadrados (HUGUES, 1993, p.376). Num contexto de rápida expansão e interligação dos sistemas elétricos, tornou-se prática comum e necessária a simplificação do sistema completo, que era, então, reduzido a uma região de interesse delimitada por barras de fronteira nas quais eram conectados elementos que representassem o comportamento da rede externa e suas reações a mudanças na rede interna. Esse tipo de artifício possibilitou uma das grandes virtudes de tais práticas de simulação, que era a realização de testes para melhorar a previsibilidade das consequências de alterações na rede de interesse, como contingências ou adições de carga e geração, o que é, sem dúvida, fundamental para estudos relacionados tanto ao planejamento quanto à operação dos sistemas. Na seção seguinte, são apresentadas as metodologias utilizadas para obtenção dos equivalentes e um pouco da teoria que as originou.

2.2 MÉTODO DOS EQUIVALENTES DE WARD

Inicialmente, como descrito por J.B. Ward em seu artigo *Equivalent Circuits for Power Flow Studies*, de 1949, havia duas metodologias usualmente empregadas para a obtenção dos circuitos equivalentes. A primeira, mais simples, consistia em delimitar uma região de interesse, a ser representada detalhadamente, e, a partir de estimativas dos fluxos de potência na fronteira dessa região, obtidas de medições ou estudos prévios, conectar cargas ou geradores que produzissem esses fluxos. Nesse método, as ligações entre as barras de fronteira, que representariam o equivalente do sistema reduzido, são completamente omitidas, de modo que esse é um método que não representa acuradamente as reações da rede externa a modificações na rede interna. A segunda metodologia incluía a representação das ligações entre as barras de fronteira pelas chamadas impedâncias de transferência, de modo que a rede externa poderia ser representada de maneira mais acurada. Entretanto, para obtenção dessas impedâncias era necessária uma montagem anterior e análise da região a ser simplificada.

Para facilitar o entendimento e garantir a consistência entre as denominações utilizadas ao longo deste trabalho, apresenta-se na Figura 6 a representação de uma

Figura 6 – Representação genérica de um sistema dividido em regiões

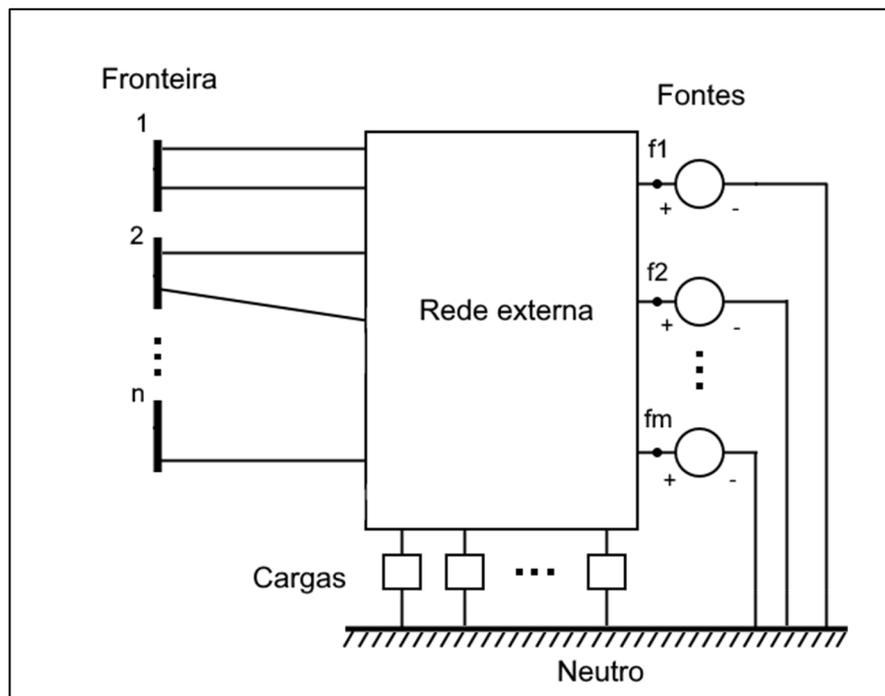


Fonte: O autor (2022). Adaptado de (MONTICELLI, 1983, p.128)

rede genérica dividida em duas regiões, as redes interna e externa, as quais são conectadas por meio de um conjunto de barras denominado de fronteira. Considera-se a rede interna como a região que se quer manter após a obtenção da rede equivalente, ou seja, a região que se quer estudar detalhadamente, e a rede externa como a região a ser eliminada e substituída por elementos, ligados às barras de fronteira, os quais representarão seu comportamento. Como somente a região externa será substituída, permanecendo as demais intactas, denomina-se como região de interesse a rede interna e a fronteira.

Voltando à descrição metodológica, para obter o equivalente da rede externa com o analisador de redes, montava-se um circuito somente com a rede externa e a fronteira, tal como mostrado na Figura 7, em que as fontes e as cargas estão evidenciadas.

Figura 7 – Circuito para obtenção do equivalente da rede externa

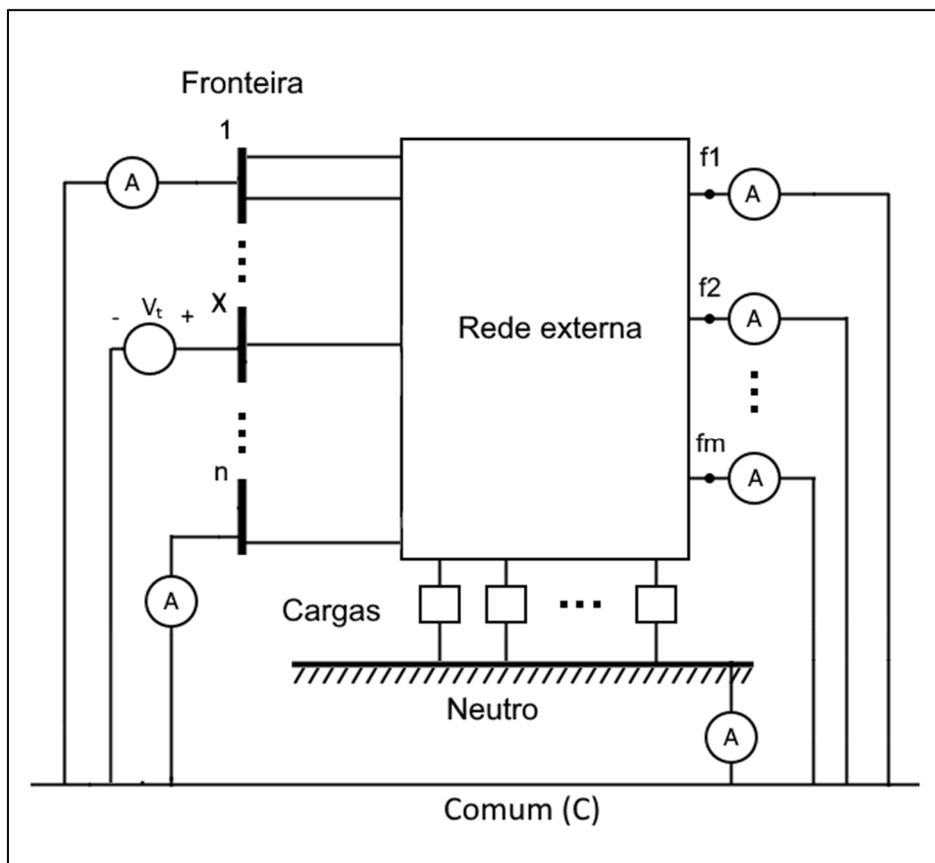


Fonte: O autor (2022). Adaptado de (WARD, 1949, p.374)

Os procedimentos subsequentes concentravam-se na determinação de uma malha equivalente cujos nós são as barras de fronteira e os nós das fontes, eliminando, portanto, os nós não representados na Figura 7. Prosseguia-se, então, à retirada das fontes, que seriam, numa representação matricial desse sistema, os termos independentes. Para medir as impedâncias entre um determinado nó x e os

demais, inclusive o neutro, conectavam-se todos os outros nós a um barramento comum, denominado C, por meio de amperímetros e, entre o nó x em questão e o terminal comum, ligava-se uma fonte de tensão. O barramento comum era ligado ao neutro também com uma medição de corrente. Com essa montagem, mostrada na Figura 8, a impedância entre o nó x e um outro nó k é dada pela divisão da tensão aplicada ao nó x pela corrente medida entre o nó k e o terminal comum, sendo k

Figura 8 – Montagem para obtenção das impedâncias equivalentes



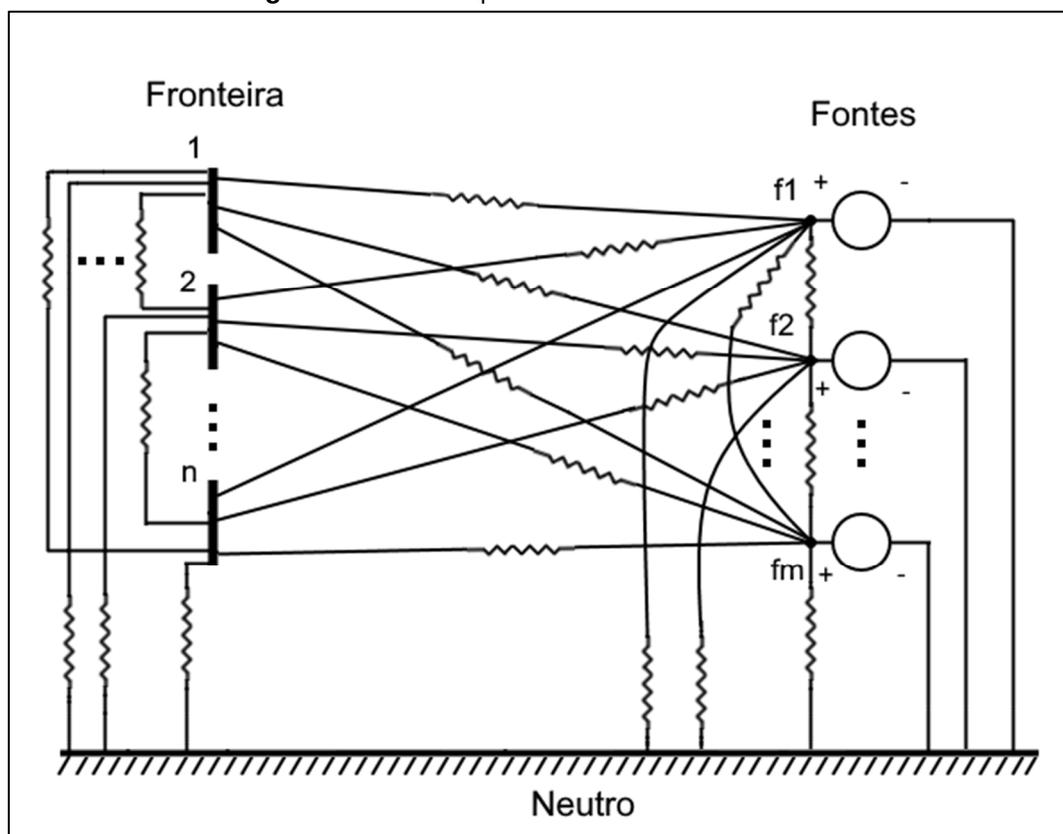
Fonte: O autor (2022). Adaptado de (WARD, 1949, p.375)

qualquer nó da fronteira, das fontes independentes, ou o próprio neutro. Quando k é o neutro, a mesma regra se aplica, sendo a corrente em questão a medida entre o terminal comum e o neutro.

A fim de entender o porquê desse resultado, é interessante observar que essa prática muito se assemelha ao desenvolvimento do equivalente de Thévenin visto entre dois terminais de um determinado circuito. Para obtenção da impedância nesse caso mais elementar, basta que sejam substituídas por curtos-circuitos as fontes internas do sistema e aplicada uma tensão externa conhecida. Analisando a situação do ponto de vista do sistema equivalente, composto somente pela impedância, é

imediatamente que a razão entre a tensão e a corrente medida no mesmo ramo é a impedância equivalente, que representará o comportamento do circuito juntamente com a tensão equivalente, lembrando que esse teorema só pode ser aplicado para circuitos com característica tensão versus corrente linear. Para a montagem em análise, pode-se utilizar do mesmo argumento a fim de compreender a metodologia, observando a malha equivalente da Figura 9. Ao curto-circuitar os terminais exceto um terminal x qualquer, todas as impedâncias, exceto as ligadas ao terminal x serão curto-circuitadas, não passando por elas nenhuma corrente, e a tensão entre o terminal x e qualquer dos outros terminais será a própria tensão aplicada entre x e o neutro. Então, a corrente medida entre o nó k e a terra só pode ser a corrente que passa na impedância que liga o nó k ao nó x , uma vez que pelas outras impedâncias ligadas ao nó k não passa corrente. Sendo assim, a tensão aplicada é a própria tensão entre x e k e a corrente medida é a corrente que passa na impedância desse ramo, de modo que basta mesmo aplicar a lei de Ohm. A metodologia descrita, então, nada mais é que uma aplicação direta da teoria de circuitos equivalentes generalizada. Salienta-se que as cargas do circuito original foram incorporadas às impedâncias

Figura 9 – Malha equivalente da rede externa



Fonte: O autor (2022). Adaptado de (WARD, 1949, p.375)

equivalentes calculadas, de modo que se houverem mudanças nessas cargas, o procedimento precisa ser refeito.

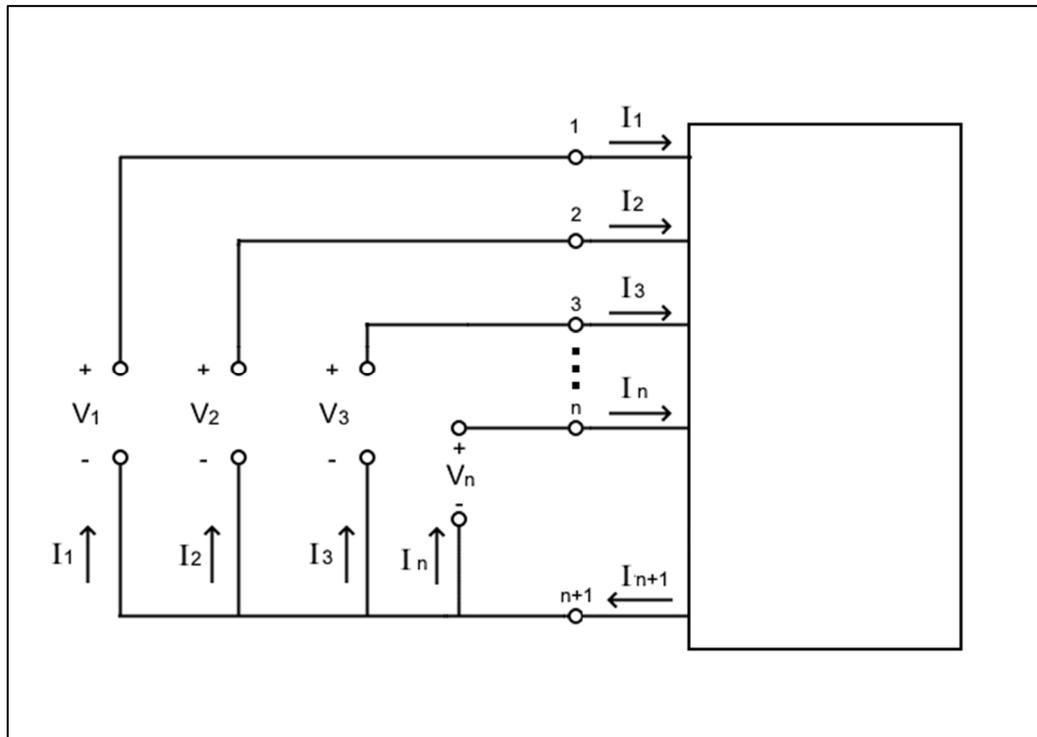
Analisando a situação à luz da teoria de circuitos equivalentes de n portas, apenas para uma breve digressão teórica, o método dos equivalentes de Thévenin mais simples é um método de equivalente de uma porta, ou seja, se propõe a encontrar a impedância equivalente vista entre apenas dois terminais, que compõe uma porta. É importante salientar que uma porta de uma rede não é uma mera dupla de terminais, mas uma dupla para a qual a corrente que entra em um dos terminais é igual à que sai pelo outro, e ainda, que essa condição não é uma restrição às ligações internas da rede, mas às externas (HUELSMAN, 2011, p. 50).

Portanto, para que um determinado par de terminais de uma rede seja uma porta, basta que, na rede externa, seja ligado um único elemento entre seus terminais. Aqui é importante que não se confundamos termos que denominam as regiões da rede completa com relação aos resultados a serem obtidos pelo procedimento de equivalentes, tal como definidos anteriormente na Figura 6, e os termos que indicam a posição de barras relativas a uma determinada rede. Por exemplo, na Figura 7, as barras de 1 a n e de f_1 a f_m são externas à rede anteriormente denominada de rede externa. É imediato ver que as duplas de terminais formadas por um terminal de uma fonte e o neutro são portas, uma vez que a ligação da fonte de tensão, único elemento entre cada par de terminais, garante a igualdade de correntes requerida. Para os terminais de 1 a n , não é possível garantir, de forma genérica, que um determinado par de terminais desse conjunto atenderá aos requisitos para denominação como porta, já que isso depende das ligações da rede interna da Figura 6.

Uma solução para esse impasse teórico é que cada terminal desse conjunto componha uma porta com o neutro, ou, melhor dizendo, com um terminal derivado do neutro, uma vez que se pode definir vários terminais ligados ao neutro do circuito, por cada um circulando correntes distintas entre si e com cada uma igual à corrente de seu par terminal. A soma dessas correntes distintas resulta na corrente total do neutro, conforme mostra a Figura 10. É por isso que para uma rede com $n+1$ terminais convém arbitrar um deles como a referência e medir todas as outras tensões em relação a essa referência, definindo um circuito de n portas, cada uma formada pela referência e outro terminal (HUELSMAN, 2011, p. 73-75). Esse caso especial da teoria de circuitos de n portas é amplamente utilizado para sistemas elétricos já que possibilita

a representação matricial bem definida da rede, relacionando as tensões nodais e injeções de corrente por meio das matrizes impedância ou admitância.

Figura 10 – Rede de $n+1$ terminais e n portas



Fonte: O autor (2022). Adaptado de (HUELSMAN, 2011, p.73)

Uma vez tendo demonstrado a validade da metodologia adotada para obtenção das impedâncias equivalentes por analogia ao método de Thévenin para uma porta, é interessante também analisar matricialmente a situação, renomeando os $n + m$ terminais da Figura 7 de tal forma que se tenha n terminais, cada um compondo uma porta com a referência, tal como na Figura 10. Com isso, pode-se escrever a equação matricial do sistema

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_x \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1x} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ z_{x1} & & \ddots & & z_{xn} \\ \vdots & & & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nx} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_x \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

O procedimento adotado consiste em curto circuitar todas as portas exceto a do terminal x , de modo que o sistema passa a ter a equação

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ V_x \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1x} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ z_{x1} & & \ddots & & z_{xn} \\ \vdots & & & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nx} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_x \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.2.2)$$

A resolução desse sistema para as correntes pode ser efetuada utilizando reduções sucessivas ou mesmo utilizando a conhecida regra de Cramer. O primeiro método é mais prático para sistemas maiores, especialmente em soluções computacionais. Pelo formato do sistema, com todos os termos independentes, exceto um, nulos, pode-se afirmar que é possível realizar reduções sucessivas, eliminando os termos z fora da diagonal principal, mas mantendo intacta a coluna x . Para isso basta usar a primeira equação para eliminar os termos da primeira coluna de todas as demais, com o sistema resultante, usar a segunda equação para eliminar os termos da segunda coluna de todas as demais e repetir o processo para todas as outras equações, exceto a da linha x . Como as tensões dessas linhas são nulas, o termo independente da linha x não será alterado por nenhuma operação. Após realizar esse procedimento, o sistema resultante consistirá em uma equação que relaciona a tensão V_x diretamente com a corrente I_x e $n-1$ equações que relacionam as outras correntes com a corrente I_x , uma vez que os termos não nulos são apenas os da diagonal principal e da coluna x , tal como a seguir

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ V_x \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z'_{11} & \cdots & z'_{1x} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & z'_{xx} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & z'_{nx} & \cdots & z'_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_x \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

Analisando a equação da linha x , tem-se que

$$V_x = z'_{xx} \cdot I_x \Rightarrow z'_{xx} = \frac{V_x}{I_x} \quad (2.2.4)$$

Sendo o termo de impedância fruto dos cálculos realizados e, de acordo com o que já foi discutido, por analogia ao teorema de Thévenin, correspondente à impedância equivalente entre o terminal x e o neutro. Para obter as outras

impedâncias ligadas ao nó x , é necessário obter uma equação que envolva apenas V_x e a corrente no outro nó do ramo da impedância, genericamente denominado de nó k . De maneira geral, pode-se escrever que

$$z'_{kk} \cdot I_k + z'_{kx} \cdot I_x = 0 \Rightarrow I_x = -\frac{z'_{kk}}{z'_{kx}} \cdot I_k \quad (2.2.5)$$

Substituindo na equação (2.2.4), tem-se que

$$V_x = z'_{xx} \cdot \left(-\frac{z'_{kk}}{z'_{kx}} \right) \cdot I_k \Rightarrow \begin{cases} V_x = Z_{xk} \cdot I_k \\ Z_{xk} = -\frac{z'_{kk} \cdot z'_{xx}}{z'_{kx}} \end{cases} \quad (2.2.6)$$

Conforme já discutido, Z_{xk} é o resultado para a impedância entre os nós x e k no circuito equivalente. Outra maneira de observar essa correspondência do método prático com uma abordagem analítica seria utilizando a regra de Cramer, que, embora não seja muito adequada para circuitos grandes dada a quantidade de operações necessárias para cálculo dos determinantes e dos seus cofatores, provê o resultado teórico esperado de maneira imediata pelo seu enunciado, conforme a equação (2.2.7) (GUILLEMIN,1953, p.120).

$$I_k = \frac{1}{R} \cdot \sum_{i=1}^n R_{ik} \cdot V_i \quad (2.2.7)$$

Com R sendo o determinante do sistema e os termos R_{ij} , os cofatores. Como apenas V_x não é nulo, tem-se que (GUILLEMIN,1953, p.154)

$$I_k = \frac{R_{xk}}{R} \cdot V_x \quad (2.2.8)$$

Desse modo, fica claro que se pode definir a impedância entre o nó x e o nó k como

$$Z_{xk} = \frac{R}{R_{xk}} \quad (2.2.9)$$

Salienta-se que os termos da matriz inicial que descreve o sistema não representam as impedâncias entre os nós. Por exemplo, z_{ij} na equação (2.2.1) não tem o valor da impedância entre os nós i e j . Esses termos da matriz são obtidos da maneira usual para parâmetros z de sistemas de n portas, por meio de medições no circuito em condições especiais. Como a equação (2.2.1) vale para todos os valores de corrente e de tensão nas portas, para obter z_{ij} , por exemplo, convém aplicar uma tensão conhecida na porta i e medir a corrente na porta j com as demais portas em aberto, ou seja, com corrente nula. Nessa condição, a equação da linha i torna-se, simplesmente

$$V_i = z_{ij} \cdot I_j \Rightarrow z_{ij} = \frac{V_i}{I_j} \quad (2.2.10)$$

É muito interessante observar que a diferença entre a obtenção de uma entrada da matriz de impedância de barras do sistema e da impedância propriamente dita entre os nós em questão no equivalente do sistema, é apenas a diferença entre as condições de medição da corrente na porta, pois a equação é a mesma. Para calcular z_{ij} , termo da matriz, basta usar a equação conforme descrito, com apenas a porta j em curto, mas para calcular Z_{ij} , impedância entre os nós i e j , todas as demais portas deverão também estar em curto, tal como descrito pelo teorema dos equivalentes de Thévenin generalizado.

Os resultados obtidos nas equações (2.2.4) e (2.2.6) podem parecer estranhos com relação ao que se conhece da aplicação do teorema de Thévenin a sistemas representados pela matriz Z barra, uma vez que é de amplo conhecimento que a impedância de um sistema vista a partir de um determinado terminal e a impedância vista entre dois terminais são dadas respectivamente por (STEVENSON; GRAINGER, 1994, p. 287-292)

$$\begin{cases} Z_{th,k} = z_{kk} \\ Z_{th,kj} = z_{kk} + z_{jj} - 2z_{kj} \end{cases} \quad (2.2.11)$$

Entretanto, ao observar cuidadosamente a teoria desenvolvida para obtenção dessas equações, fica claro que elas, na verdade, são aplicações do teorema de Thévenin para apenas uma porta, ou seja, aplicam-se à redução de toda a rede representada matricialmente a apenas uma impedância e uma fonte independente entre os terminais requeridos, tal como no teorema de Thévenin original. Inclusive, essas equações são bastante utilizadas em análises de curto-circuito, quando se almeja justamente representar a porção não faltosa do sistema por meio de um circuito equivalente visto a partir de uma porta, seja uma porta entre uma barra e o neutro, no caso das faltas shunt, seja uma porta entre duas barras no caso de uma falta série. No contexto de estudos de fluxo de potência, não é interessante obter equivalentes vistos a partir de uma única porta, já que se deseja manter os terminais da região interna para análise detalhada e reduzir somente a rede externa, a fim de simular seu comportamento. Sendo assim, fica bem delimitada a distinção entre as duas abordagens, evitando confusões acerca da terminologia utilizada, pois embora as impedâncias da equação (2.2.4) e da primeira equação em (2.2.11) sejam impedâncias entre um determinado nó e o neutro, representam conceitos diferentes. A primeira é a impedância entre esse nó e o neutro numa malha equivalente de comportamento idêntico ao circuito original, representado matricialmente pela equação (2.2.1), e a segunda é a impedância que representa o comportamento de todo o sistema quando visto a partir de uma única porta.

Após esta breve digressão, que deixou clara a relação da análise nodal de circuitos com a teoria de circuitos de n portas, sendo a primeira um caso especial da segunda, começa também a ficar evidente a estreita relação que existe entre equivalência de circuitos e eliminação de nós. Como se viu, o resultado obtido pelo teorema de Thévenin generalizado pôde ser expresso a partir de equações oriundas da matriz que descrevia o circuito completo por meio de um processo de redução. Isso representa não só a congruência entre um método analógico e um método numérico, ou digital, mas evidencia a importância do entendimento do primeiro para que se possa implementar o segundo, tendo em vista que, quando da obtenção das equações (2.2.4) e (2.2.6), já se sabia que as impedâncias envolvidas eram as do sistema equivalente. Ou seja, só o fato de obter tais equações não garante serem as impedâncias calculadas as do sistema equivalente. Nesse caso, o método numérico funcionou com o respaldo da conclusão analógica já conhecida.

Voltando ao assunto do analisador de rede e dos métodos de equivalente, fica

claro que as metodologias adotadas até que Ward introduzisse novos procedimentos apresentavam a desvantagem de não eliminar os nós das fontes da rede externa à rede de interesse. Além disso, do ponto de vista teórico, utilizar matrizes impedância para relacionar parâmetros nodais de um circuito implica em maiores esforços para modelagem da rede, uma vez que a obtenção dessas matrizes envolve uma medição para cada um de seus termos, conforme comentado, ou a aplicação do dispendioso método de determinação direta da matriz Z barra a partir do circuito correspondente (STEVENSON; GRAINGER, 1994, p. 301-305). Como mostra a teoria de circuitos, é muito mais simples relacionar tensões nodais e injeções de corrente por meio de matrizes admitância, cujo processo de obtenção, no contexto de sistemas de potência, é mostrado na Seção 2.3.

Desse modo, a nova metodologia proposta por Ward, que consistia na representação das cargas e das gerações como injeções de corrente e não mais, respectivamente, como impedâncias constantes e fontes de tensão, possibilitou a eliminação dos terminais das gerações da rede externa, preservando somente a região de interesse, composta pela rede interna e a fronteira. Ao eliminar os terminais de geração e de cargas, tornou-se necessário calcular os fatores de distribuição, a fim de representar de forma distribuída, ao longo da fronteira, os efeitos de injeção de corrente provocados por esses elementos, simulando o comportamento da rede externa de forma mais acurada. Conforme observado por Ward, com essa representação por meio de injeções de corrente, que requer certas considerações práticas listadas no artigo, a diferença entre cargas e gerações é somente o sinal da injeção, entendendo-se as cargas como gerações negativas (WARD, 1949).

A obtenção desses fatores é realizada ligando ao neutro, por meio de amperímetros, todos os terminais da fronteira, os terminais de 1 a n na Figura 7; desconectando todas as fontes e cargas da rede externa; e conectando à fonte da qual se quer obter os fatores de distribuição um gerador ajustado para produzir corrente de 1 Ampère ou 1 p.u. Em primeira aproximação, os valores das correntes medidas que circulam pelas barras de fronteira já são os fatores de distribuição, caso a diferença angular entre a corrente aplicada e as medidas não seja muito grande, o que ocorre se a razão x/r nas linhas for uniforme. Caso contrário, pode-se representar esses fatores como quantidades complexas, sendo eles calculados da mesma forma, pela razão entre a corrente medida e a aplicada (WARD, 1949, p.375).

O processo é repetido para todas as outras fontes e cargas da rede externa,

cada uma resultando em um fator de distribuição para cada barra da fronteira, de modo que, por superposição, a injeção equivalente numa barra k da fronteira pode ser expressa pela equação

$$I_k = \sum D_{ik} \cdot I_i \quad (2.2.12)$$

Em que os termos D são os fatores de distribuição e o índice i representa a injeção correspondente, seja proveniente de carga, seja de fonte. Há várias possibilidades de aplicação desse método. Por exemplo, pode-se realizar o processo acima descrito separadamente para barras e para cargas, de modo a se obter para cada barra k da fronteira uma injeção negativa, correspondente à carga equivalente e outra positiva, correspondente à geração. Outra opção é calcular somente uma equação tal como a (2.2.12) para cada barra k , que contemple tanto gerações como cargas, obtendo assim uma injeção líquida nessa barra. De todo modo, para sistemas com muitas cargas e gerações a serem reduzidas esse método pode não ser muito prático, sendo mais vantajoso representar as cargas como impedâncias constantes e obter as cargas equivalentes em cada barra em consequência do cálculo das impedâncias da rede equivalente. Ressalta-se que, no método proposto por Ward, a malha equivalente, que agora interligará somente as barras de fronteira, é calculada pelo mesmo método de Thévenin generalizado, tal como já descrito (WARD, 1949, p.375).

Conforme analisado pelo próprio Ward, a então nova proposta metodológica, apesar de ser um meio termo entre as metodologias aplicadas até aquele momento, sendo mais precisa que a da potência constante e mais simplificada que a da malha equivalente com retenção das cargas e geradores externos, poderia apresentar significativos erros quando, em face a mudanças na rede de interesse, o sistema externo, que havia sido simplificado, reagisse de maneira a alterar as correntes fornecidas pelos geradores, violando a premissa básica de aplicação do método. Ou seja, qualquer alteração que solicitasse resposta de suporte de reativos da rede externa não seria bem representada pela metodologia em questão. Posteriormente, essas limitações motivaram o desenvolvimento de extensões ao método de Ward, tal como abordado na Seção 2.4.

Antes de prosseguir, entretanto, é interessante fazer mais uma digressão

teórica. Analiticamente, o método de Ward pode ser aplicado para redução de redes fazendo-se uso da transformação estrela-malha generalizada para eliminar um a um os nós da rede externa. Caso um deles apresente injeções, estas são distribuídas pelos nós da malha equivalente obtida pela transformação. É evidente que essa abordagem não é prática, e infactível manualmente para redes extensas, mas possui importância teórica, especialmente pela ideia de redistribuir as injeções de corrente nos nós a serem eliminados por injeções equivalentes, ideia que foi utilizada de maneira mais expedita pelo método prático descrito, por meio dos fatores de distribuição. A transformação generalizada, cuja demonstração é semelhante à conhecida transformação Y-Delta, é dada abaixo e sua demonstração pode ser encontrada em (SHEN,1947):

$$Z_{jk} = Z_j \cdot Z_k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \quad (2.2.13)$$

Outra observação interessante é a de que a redução por transformações estrela-malha sucessivas é equivalente ao método de redução matricial apresentado por Gabriel Kron no Capítulo 10 de seu livro *Tensor Analysis of Networks* (KRON,1939, p.378). Uma rápida discussão dessa concordância entre os dois métodos também é apresentada por Stevenson nas seções 7.6 e 7.7 do livro *Power System Analysis* (STEVENSON; GRAINGER,1994, p.263-274). Esse tipo de abordagem, mais sistemática, abriu caminho para a implementação numérica dessas metodologias na forma de algoritmos computacionais, sendo, portanto, mais relacionado aos objetivos finais deste trabalho. Dessa forma, as próximas seções se concentram na abordagem matricial para modelagem e redução de redes.

2.3 MODELAGEM DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Na teoria de circuitos elétricos, há, fundamentalmente, duas abordagens para o problema de análise de redes: a análise nodal e a análise de malhas, ambas baseadas nas duas leis de Kirchhoff. Como bem apresentado no Capítulo 10 do livro *Basic Circuit Theory*, dos autores Charles Desoer e Ernest Kuh, a análise nodal relaciona tensões nodais, ou seja, entre nós do circuito e o neutro, com injeções

independentes de corrente nos nós por meio da matriz admitância de nó, tal como abaixo (DESOER; KUH, 1969, p.425)

$$Y_n \cdot E = I_s \quad (2.3.1)$$

Por sua vez, a análise de malhas relaciona as tensões e correntes nos ramos do circuito por meio da matriz impedância de malha. Nessa análise, as tensões passam a ser os termos independentes, e as correntes, as variáveis, conforme abaixo (DESOER; KUH, 1969, p.462)

$$Z_m \cdot i = e_s \quad (2.3.2)$$

As matrizes presentes nas equações (2.3.1) e (2.3.2) podem ser obtidas de forma mais sistemática, com o auxílio de matrizes incidência, utilizando conceitos de grafos, mas também podem ser obtidas por inspeção, utilizando as conhecidas regras de construção diretamente a partir das informações do circuito. Para a matriz admitância nodal, a mais utilizada, é possível demonstrar que:

- O termo da diagonal principal da linha k , y_{kk} , corresponde à soma de todas as admitâncias ligadas ao nó k ; e
- O termo da linha i e coluna j , com i diferente de j , é dado pelo negativo da soma das admitâncias entre os nós i e j .

Regra análoga vale para a matriz impedância de malha. Entretanto, para as correspondentes matrizes inversas, não há metodologia simples. Conforme já comentado na seção anterior, a obtenção da matriz impedância de nó pode ser bastante trabalhosa. Dessa forma, ao realizar análises com grandezas nodais, as quais, no contexto de sistemas de potência são as mais utilizadas, tendo em vista que se tem interesse nas tensões nas barras para determinação do estado da rede, é muito mais conveniente utilizar matrizes admitância que matrizes impedância.

Com essa observação teórica, fica ainda mais evidente a virtude do método introduzido por Ward, que abriu caminho para a modelagem de redes nos problemas de equivalentes utilizando matrizes admitância de nó, ao invés de matrizes impedância de nó, podendo ser considerada essa contribuição como precursora dos métodos computacionais aplicados a sistemas de potência, já que geralmente utilizam

matrizes admitância.

Porém, nesse contexto, é necessário expandir a modelagem básica realizada nos livros de teoria de circuitos visando englobar modelos de equipamentos como transformadores à matriz admitância. Além disso, especificamente nos problemas de fluxo de potência, para os quais se tem interesse na determinação dos módulos e ângulos das tensões nas barras, ou seja, do estado da rede, a partir de informações especificadas em certas barras, a metodologia de análise é bastante diferente da empregada na teoria de circuitos. As tensões complexas do sistema, nesse contexto, passam a ser obtidas com base em informações do módulo da tensão e da potência nas barras, de modo que o problema se torna não linear, diferentemente do sistema da equação (2.3.1).

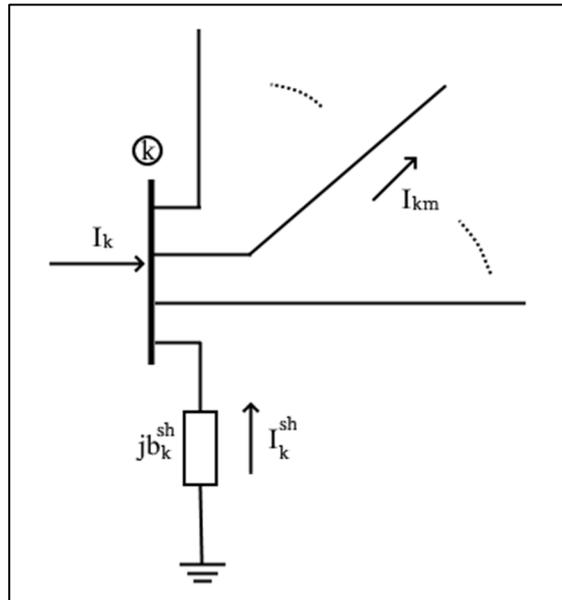
O objetivo desta seção não é desenvolver a resolução completa do problema de fluxo de potência, a qual pode ser encontrada de forma muito didática e completa no excelente livro Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica (1983), do autor Alcir Monticelli, mas apenas desenvolver a modelagem necessária para o entendimento da implementação matricial do método de Ward e de suas extensões.

Fundamentalmente, há três tipos de barras na modelagem do sistema, que fornecem as informações especificadas, a partir das quais é determinado o estado da rede e os fluxos de potência nas linhas. São elas (MONTICELLI, 1983, p. 1-2):

- As barras PQ, que possuem potência ativa e reativa conhecidas (especificadas);
- As barras PV, que possuem potência ativa e módulo da tensão especificados; e
- A barra $V\theta$, ou de referência, que possui módulo e ângulo da tensão especificados.

Só há uma barra de referência para cada sistema conexo e essa barra cumpre a dupla função de definir a referência angular para o sistema e fechar o balanço de potência ativa, já que é a única barra para a qual o P não é especificado. Para cada barra, haverá, então, uma equação de balanço de potência ativa e outra de potência reativa, obtidas a partir da própria lei de Kirchhoff dos nós. Para garantir a consistência no decorrer deste trabalho, a Figura 11 apresenta a convenção de sinais usual para fluxos de potência e correntes.

Figura 11 – Convenção de sinais



Fonte: O autor (2022). Adaptado de (MONTICELLI, 1983, p.4)

Aplicando a lei dos nós e denominando por Ω_K o conjunto de todas as barras vizinhas à barra k , obtém-se que

$$\vec{I}_k + \vec{I}_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_K} \vec{I}_{km} \quad (2.3.3)$$

Tomando o conjugado da equação (2.3.3) e multiplicando pela tensão na barra k , obtêm-se as potências complexas, tal como a seguir

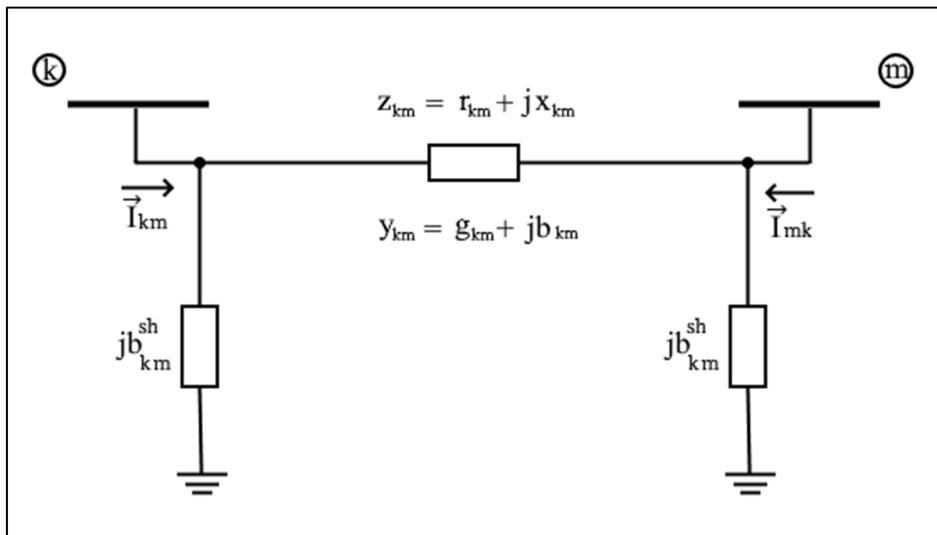
$$\hat{S}_k + jQ_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_K} \hat{S}_{km} \quad (2.3.4)$$

Note-se que a potência do termo *shunt* é puramente reativa. Separando as partes reais e imaginárias, obtém se as ditas equações de balanço de potência:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_k = \sum_{m \in \Omega_K} P_{km} \\ Q_k + Q_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_K} Q_{km} \end{array} \right. \quad (2.3.5)$$

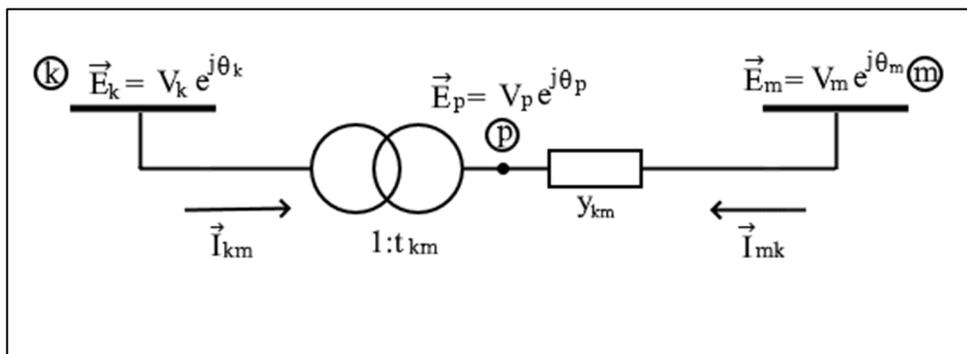
Os fluxos entre barras do sistema, por sua vez, dependem dos módulos e ângulos das tensões nas barras correspondentes (k e m), conforme será verificado ao desenvolver o modelo da rede, com base nos elementos que compõem os seus ramos. De maneira geral, esses elementos se resumem a linhas de transmissão e transformadores.

Figura 12 – Modelo pi de linhas de transmissão



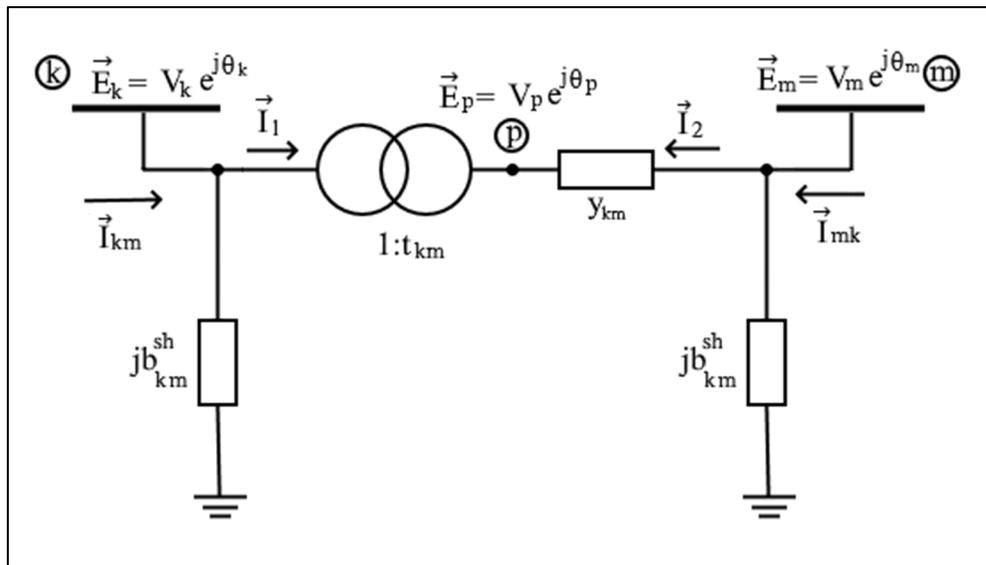
Fonte: O autor (2022). Adaptado de (MONTICELLI, 1983, p.5)

Figura 13 – Modelo de transformador



Fonte: O autor (2022). Adaptado de (MONTICELLI, 1983, p.8)

Figura 14 – Modelo unificado de um ramo do sistema elétrico



Fonte: O autor (2022).

Diferentemente do processo bastante didático de deduzir as equações de fluxo para a linha modelada como circuito π , depois deduzir as equações para os transformadores defasadores e em fase, para em seguida, por analogia, obter equações gerais, válidas para os três casos, como propôs Monticelli, essas equações gerais serão aqui desenvolvidas diretamente, por meio de um modelo generalizado de um ramo da rede. A Figura 12 e a Figura 13 representam os modelos de linha e de transformador, respectivamente e a Figura 14, o modelo unificado.

Esse modelo unificado permite abordagem generalizada do problema, adaptando-se os parâmetros de acordo com a situação. Quando o elemento entre as barras k e m for uma linha de transmissão, basta fazer $t = 1$. Quando for um transformador, basta fazer as admitâncias shunt nulas, o que representaria circuito aberto entre as barras e o neutro. Desse modo, o modelo recai nas situações apresentadas na Figura 12 e na Figura 13 respectivamente. O modelo de transformador apresentado pode ainda ser subdividido em dois modelos mais simples: o do transformador em fase, para o qual t é real puro e o do transformador defasador, para o qual t é imaginário puro. Optou-se, entretanto, por considerar uma situação geral, com t imaginário na forma

$$t_{km} = a_{km} \cdot e^{j\varphi_{km}} \quad (2.3.6)$$

É importante também definir uma notação para o tap do transformador, tal como é feito com a admitância. Ao utilizar o índice km , considera-se a admitância referida para o lado da barra m assim como o tap. A introdução desse índice possibilitará uma generalização das equações obtidas para as correntes, conforme se demonstrará mais adiante.

Para o transformador, considera-se modelo ideal em série com uma admitância. Desse modo, não há perdas na porção ideal do modelo, de modo que se pode escrever, observando a notação estabelecida na Figura 14, que

$$\begin{cases} \vec{E}_k \cdot \vec{I}_1^* + \vec{E}_p \cdot \vec{I}_2^* = 0 \\ \frac{\vec{E}_p}{\vec{E}_k} = t_{km} \end{cases} \quad (2.3.7)$$

Utilizando as duas equações, pode-se obter uma relação entre as correntes complexas:

$$\begin{pmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \end{pmatrix}^* = -\frac{\vec{E}_p}{\vec{E}_k} = -t_{km} \Rightarrow \frac{\vec{I}_1}{\vec{I}_2} = -t_{km}^* \quad (2.3.8)$$

Aplicando a lei dos nós ao nó k , obtém-se que

$$\vec{I}_{km} = \vec{I}_1 + \vec{E}_k \cdot j b_{km}^{sh} \quad (2.3.9)$$

Utilizando a equação (2.3.8) juntamente com a expressão para a corrente através da admitância y_{km} , obtém-se que

$$\begin{cases} \vec{I}_{km} = (-t_{km}^*) \cdot \vec{I}_2 + \vec{E}_k \cdot j b_{km}^{sh} \\ \vec{I}_2 = (\vec{E}_m - t_{km} \cdot \vec{E}_k) \cdot y_{km} \end{cases} \quad (2.3.10)$$

$$\Rightarrow \vec{I}_{km} = (-t_{km}^*) \cdot (\vec{E}_m - t_{km} \cdot \vec{E}_k) \cdot y_{km} + \vec{E}_k \cdot j b_{km}^{sh}$$

Desenvolvendo os produtos e agrupando os termos de mesma tensão,

$$\vec{I}_{km} = (|t_{km}|^2 \cdot y_{km} + jb_{km}^{sh}) \cdot \vec{E}_k - t_{km}^* \cdot \vec{E}_m \cdot y_{km} \quad (2.3.11)$$

Equação análoga pode ser obtida para a corrente que sai da barra m . Para isso, basta aplicar mais uma vez a lei de Kirchhoff e usar a relação de transformação:

$$\begin{aligned} \vec{I}_{mk} &= (\vec{E}_m - t_{km} \cdot \vec{E}_k) \cdot y_{km} + \vec{E}_m \cdot jb_{km}^{sh} \\ \Rightarrow \vec{I}_{mk} &= (y_{km} + jb_{km}^{sh}) \cdot \vec{E}_m - t_{km} \cdot \vec{E}_k \cdot y_{km} \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

A partir das equações (2.3.11) e (2.3.12), é possível obter a formulação matricial do sistema bem como as fórmulas dos fluxos de potência nos ramos. Antes, entretanto, é interessantíssimo observar que essas equações na verdade são redundantes, são a mesma equação. A notação introduzida permite que se realize a conversão entre as duas apenas trocando os índices dos termos k e m e observando as definições do tap e da admitância série. De fato, não há primazia da escolha da nomenclatura de nós utilizada, de modo que não necessariamente o nó m é o nó para cujo lado está referida a admitância y_{km} . Poder-se-ia muito bem ter denominado na Figura 14 a barra m por barra k e vice-versa. Seguindo o mesmo desenvolvimento, seria obtida uma equação análoga à (2.3.11), tal como abaixo:

$$\vec{I}_{mk} = (|t_{mk}|^2 \cdot y_{mk} + jb_{mk}^{sh}) \cdot \vec{E}_m - t_{mk}^* \cdot \vec{E}_k \cdot y_{mk} \quad (2.3.13)$$

Para comparar com a equação (2.3.12), é necessário adaptar a situação para a da Figura 14, com a admitância e o tap referidos ao lado da barra m . Embora as representações estejam em p.u., a existência de um tap possivelmente diferente do nominal exige tratamento semelhante ao que se realiza quando tratando com os valores verdadeiros. Portanto, para relacionar a admitância referida ao lado m com a referida ao lado k , ou seja, y_{km} com y_{mk} , utiliza-se a relação de transformação obtida a partir do produto das relações de transformação de corrente e tensão em (2.3.7) e (2.3.8).

$$\begin{pmatrix} \vec{E}_p \\ \vec{E}_k \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \end{pmatrix} = -t_{km} \cdot t_{km}^* = -|t_{km}|^2 \quad (2.3.14)$$

Corrigindo o sentido da corrente \vec{I}_2 com o sinal, para compatibilizar com o sentido de \vec{I}_1 , obtém-se a relação de transformação do transformador ideal, generalizada para tap complexo:

$$\frac{y_{mk}}{y_{km}} = \frac{z_{km}}{z_{mk}} = \frac{\vec{E}_p/(-\vec{I}_2)}{\vec{E}_k/\vec{I}_1} = |t_{km}|^2 \quad (2.3.15)$$

Para converter o tap de uma situação para a outra basta invertê-lo, passando de uma configuração 1: t_{km} para $1/t_{km}$: 1. Dessa forma,

$$t_{mk} = \frac{1}{t_{km}} \quad (2.3.16)$$

Substituindo as equações (2.3.15) e (2.3.16) na equação (2.3.13), e observando que $b_{km}^{sh} = b_{mk}^{sh}$ obtém-se equação idêntica à (2.3.12):

$$\begin{aligned} \vec{I}_{mk} &= \left(\frac{1}{|t_{km}|^2} \cdot y_{mk} + j b_{km}^{sh} \right) \cdot \vec{E}_m - \frac{1}{t_{km}^*} \cdot \vec{E}_k \cdot |t_{km}|^2 \cdot y_{km} \\ \Rightarrow \vec{I}_{mk} &= (\vec{I}_{km} + j b_{km}^{sh}) \cdot \vec{E}_m - t_{km} \cdot \vec{E}_k \cdot y_{km} \end{aligned} \quad (2.3.17)$$

Sendo assim, para converter a equação (2.3.11) na equação (2.3.12), basta trocar as letras e utilizar as equações de conversão de parâmetros adequadas. Esse mesmo raciocínio poderá ser utilizado para dedução das fórmulas dos fluxos em ambos os lados da linha, e a vantagem é a simplificação do processo, deduzindo primeiro o lado com equacionamento mais simples, que é o lado para o qual estão referidas a admitância e o tap, e depois convertendo para o outro. Outra opção é utilizar sempre uma mesma equação, de preferência a mais simples, e realizar conversões de parâmetros. Por exemplo, suponha-se duas barras, denominadas 1 e 2. Para calcular a corrente de 1 para 2, referem-se os parâmetros para o lado da barra 1 e utiliza-se a (2.3.12) e, para calcular a corrente da barra 2 para a barra 1, referem-se os parâmetros para o lado da barra 2 e utiliza-se a mesma equação. É necessário que tanto o tap como a admitância estejam referidos ao mesmo lado.

Utilizando a técnica desenvolvida, obtêm-se os fluxos de potência na linha a partir da formulação mais simples. Retomando a Figura 14, para obter os fluxos P_{mk} e Q_{mk} , basta multiplicar a tensão \vec{E}_m pelo conjugado da corrente obtida na equação (2.3.12) e separar as partes real e imaginária. Na verdade, é mais conveniente obter o conjugado da potência complexa:

$$\begin{aligned}\hat{S}_{mk}^* &= \vec{E}_m^* \cdot \vec{I}_{mk} = \vec{E}_m^* \cdot [(y_{km} + jb_{km}^{sh}) \cdot \vec{E}_m - t_{km} \cdot \vec{E}_k \cdot y_{km}] \\ \Rightarrow \hat{S}_{mk}^* &= (y_{km} + jb_{km}^{sh}) \cdot V_m^2 - t_{km} \cdot \vec{E}_k \cdot \vec{E}_m^* \cdot y_{km}\end{aligned}\quad (2.3.18)$$

$$\Rightarrow P_{mk} - jQ_{mk} = (g_{km} + jb_{km} + jb_{km}^{sh}) \cdot V_m^2 - V_k \cdot V_m \cdot |t_{km}| \cdot e^{j(\theta_{km} + \varphi_{km})} \cdot y_{km}$$

Em que

$$\begin{cases} \vec{E}_k = V_k \cdot e^{j\theta_k} \\ \vec{E}_m = V_m \cdot e^{j\theta_m} \\ \theta_{km} = \theta_k - \theta_m \end{cases}\quad (2.3.19)$$

Desenvolvendo o produto $e^{j(\theta_{km} + \varphi_{km})} \cdot y_{km}$, tem-se que,

$$\begin{aligned}e^{j(\theta_{km} + \varphi_{km})} \cdot (g_{km} + jb_{km}) &= \\ &= g_{km} \cdot \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) + \\ &+ j[g_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})]\end{aligned}\quad (2.3.20)$$

Substituindo o resultado de (2.3.20) e separando as partes real e o negativo da parte imaginária na terceira linha de (2.3.18), obtêm-se as potências:

$$\begin{cases} P_{mk} = V_m^2 \cdot g_{km} - \\ -V_k \cdot V_m \cdot |t_{km}| \cdot [g_{km} \cdot \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\ Q_{mk} = -V_m^2 \cdot (b_{km} + b_{km}^{sh}) + \\ +V_k \cdot V_m \cdot |t_{km}| \cdot [g_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \end{cases}\quad (2.3.21)$$

Para se obter os fluxos da barra k para a barra m , pode-se realizar desenvolvimento análogo, ou trocar os índices e realizar as devidas conversões de parâmetros em (2.3.21), obtendo-se o resultado abaixo:

$$\begin{cases} P_{km} = V_k^2 \cdot |t_{km}|^2 g_{km} - \\ \quad -V_k \cdot V_m \cdot |t_{km}| \cdot [g_{km} \cdot \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\ Q_{km} = -V_k^2 \cdot (|t_{km}|^2 \cdot b_{km} + b_{km}^{sh}) + \\ \quad +V_k \cdot V_m \cdot |t_{km}| \cdot [-g_{km} \cdot \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cdot \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \end{cases} \quad (2.3.22)$$

Para isso, levam-se em consideração consequências diretas das equações (2.3.16), (2.3.15) e (2.3.16):

$$\begin{cases} g_{mk} = |t_{km}|^2 g_{km} \\ b_{mk} = |t_{km}|^2 b_{km} \end{cases}; \begin{cases} |t_{mk}| = \frac{1}{|t_{km}|} \\ \varphi_{mk} = -\varphi_{km} \end{cases} \quad (2.3.23)$$

As equações (2.3.21) e (2.3.22) se prestam ao cálculo dos fluxos nas linhas e são aplicadas após a resolução do problema do fluxo de potência, o qual é formulado com base nas equações de P_k e Q_k . Finalmente, desenvolve-se, a seguir o modelo de redes por matriz admitância, objetivo final desta seção. Para isso, basta substituir na equação (2.2.3) a expressão para \vec{I}_{km} obtida na equação (2.3.11), levando-se em conta que

$$\vec{I}_k^{sh} = -(jb_k^{sh}) \cdot \vec{E}_k \quad (2.3.24)$$

Com isso, obtém-se a equação:

$$\vec{I}_k = (jb_k^{sh}) \cdot \vec{E}_k + \sum_{m \in \Omega_K} \vec{I}_{km} \quad (2.3.25)$$

Analisando o somatório,

$$\sum_{m \in \Omega_K} \vec{I}_{km} = \sum_{m \in \Omega_K} (|t_{km}|^2 \cdot y_{km} + jb_{km}^{sh}) \cdot \vec{E}_k - \sum_{m \in \Omega_K} t_{km}^* \cdot \vec{E}_m \cdot y_{km} \quad (2.3.26)$$

Para o primeiro somatório, \vec{E}_k é constante, de modo que a equação (2.3.25) torna-se,

$$\vec{I}_k = \left[(jb_k^{sh}) + \sum_{m \in \Omega_K} (|t_{km}|^2 \cdot y_{km} + jb_{km}^{sh}) \right] \cdot \vec{E}_k + \sum_{m \in \Omega_K} (-t_{km}^* \cdot y_{km}) \cdot \vec{E}_m \quad (2.3.27)$$

Essa equação representa justamente a k-ésima linha da matriz admitância do sistema quando escrito na forma (MONTICELLI, 1983, p. 13)

$$I = Y \cdot E \quad (2.3.28)$$

Sendo assim, os termos dessa matriz são

$$\begin{cases} Y_{kk} = (jb_k^{sh}) + \sum_{m \in \Omega_K} (|t_{km}|^2 \cdot y_{km} + jb_{km}^{sh}) \\ Y_{km} = (-t_{km}^* \cdot y_{km}) \end{cases} \quad (2.3.29)$$

A equação (2.3.27) pode, então, ser escrita de forma simplificada

$$\vec{I}_k = Y_{kk} \cdot \vec{E}_k + \sum_{m \in \Omega_K} Y_{km} \cdot \vec{E}_m \quad (2.3.30)$$

Para obter as equações do problema de fluxo de potência, que são as equações das injeções de potência ativa e reativa, basta aplicar a definição de potência complexa, utilizando a equação anterior:

$$\begin{aligned} \hat{S}_k &= \vec{E}_k \cdot \vec{I}_k^* = Y_{kk}^* \cdot \vec{E}_k \cdot \vec{E}_k^* + \sum_{m \in \Omega_K} Y_{km}^* \cdot \vec{E}_m^* \cdot \vec{E}_k \\ \Rightarrow P_k + jQ_k &= V_k^2 \cdot (G_{kk} - jB_{kk}) + \sum_{m \in \Omega_K} (G_{km} - jB_{km}) \cdot V_m \cdot V_k \cdot e^{j\theta_{km}} \\ \Rightarrow \begin{cases} P_k = V_k^2 \cdot G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_K} V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \text{sen}(\theta_{km})) \\ Q_k = -V_k^2 \cdot B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_K} V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cos(\theta_{km})) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.3.31)$$

Pode-se ainda simplificar as equações denominando por K o conjunto de todas as barras vizinhas à barra k incluindo ela própria (MONTICELLI, 1983, p. 14), ficando as equações no seguinte formato:

$$\begin{cases} P_k = V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \text{sen}(\theta_{km})) \\ Q_k = V_k \cdot \sum_{m \in K} V_m \cdot (G_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cos(\theta_{km})) \end{cases} \quad (2.3.32)$$

Sendo assim, ficam explicitas as variáveis das equações em (2.2.5), tal como sugerido. As equações em (2.3.32) mostram a não linearidade do problema de fluxo de potência, que certamente é de difícil ou impossível resolução manual tal como comentado na Seção 2.1. A solução numérica desse tipo de sistema, com base nas informações de potência e tensão especificadas de algumas barras, requer a utilização do método de Newton e suas variações. Mas, não sendo esse o foco deste trabalho, prossegue-se à abordagem matricial do método de Ward e suas extensões, tendo como base a representação do sistema por meio de sua matriz admitância, conforme apresentado nesta seção.

2.4 ABORDAGEM MATRICIAL E MÉTODOS DE WARD ESTENDIDO

Retomando o que se desenvolveu na Seção 2.2, o primeiro passo para obtenção da rede equivalente é a divisão do sistema nas regiões interna e externa, delimitadas pela fronteira, tal como mostrava a Figura 6. Matricialmente, as linhas da equação (2.3.28) podem ser reordenadas de modo que se formem submatrizes correspondentes a cada região e às suas ligações com as demais. Por exemplo, suponha-se que haja e barras externas, f barras de fronteira e i barras internas. As linhas e colunas da equação (2.3.28) são, então, reordenadas de forma que as primeiras e linhas correspondam às barras externas, em alguma ordem, as f linhas seguintes, às de fronteira e as i linhas seguintes, às internas. O mesmo se faz para as colunas, organizando-as coerentemente à sequência adotada para as linhas. A reordenação das linhas garante que o vetor de correntes esteja também ordenado em três blocos, na ordem externo, fronteira, interno assim como a reordenação das colunas garante o mesmo ordenamento para as tensões nas barras. Dessa forma,

obtém-se um sistema com o formato abaixo:

$$\begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0 \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_E \\ \vec{E}_F \\ \vec{E}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{I}_E \\ \vec{I}_F \\ \vec{I}_I \end{bmatrix} \quad (2.4.1)$$

Como não há ligação direta entre as regiões interna e externa que não passe pela fronteira, as submatrizes extremas da diagonal secundária são nulas. Para obter um sistema livre das barras externas, basta substituir o valor de \vec{E}_E , obtido da primeira equação do sistema, na segunda equação (MONTICELLI, 1983, p. 129-130).

$$\begin{aligned} Y_{EE} \cdot \vec{E}_E + Y_{EF} \cdot \vec{E}_F &= \vec{I}_E \\ \Rightarrow \vec{E}_E &= Y_{EE}^{-1} \cdot (\vec{I}_E - Y_{EF} \cdot \vec{E}_F) \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

Substituindo na segunda equação de (2.4.1),

$$\begin{aligned} Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot (\vec{I}_E - Y_{EF} \cdot \vec{E}_F) + Y_{FF} \cdot \vec{E}_F + Y_{FI} \cdot \vec{E}_I &= \vec{I}_F \\ \Rightarrow (Y_{FF} - Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot Y_{EF}) \cdot \vec{E}_F + Y_{FI} \cdot \vec{E}_I &= \vec{I}_F - Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot \vec{I}_E \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

Com isso, podem-se definir uma submatriz equivalente e um vetor de corrente equivalente, tais como a seguir:

$$\begin{cases} Y_{FFeq} = (Y_{FF} - Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot Y_{EF}) \\ \vec{I}_{Feq} = \vec{I}_F - Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot \vec{I}_E \end{cases} \quad (2.4.4)$$

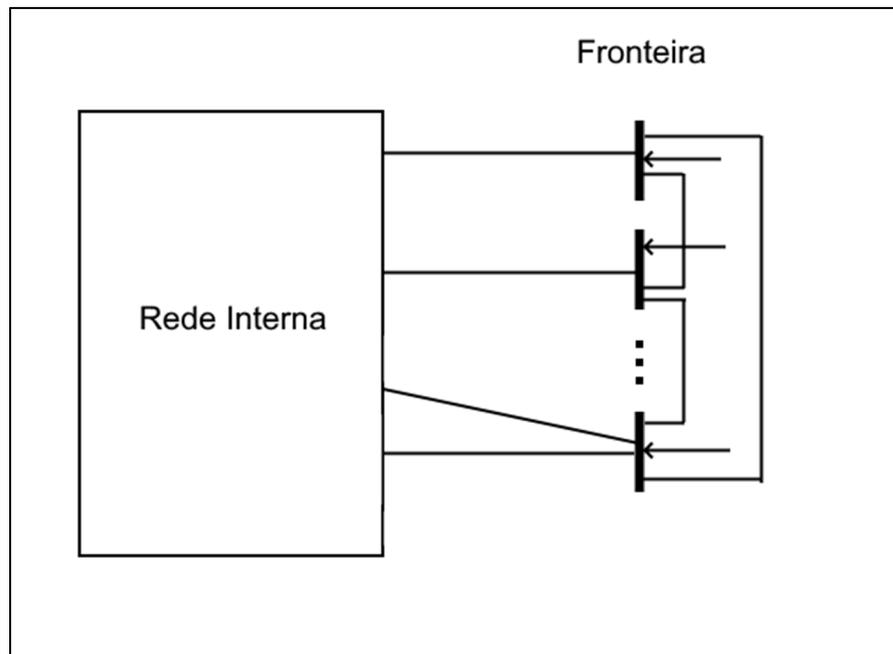
Desse modo, o sistema torna-se

$$\begin{bmatrix} Y_{FFeq} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_F \\ \vec{E}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{I}_{Feq} \\ \vec{I}_I \end{bmatrix} \quad (2.4.5)$$

É bastante interessante analisar o significado dos termos equivalentes da

equação (2.4.5), especialmente depois de conhecer o desenvolvimento analógico do método de Ward. O elemento Y_{FFeq} , tal como explicitado em (2.4.4), representa as ligações entre as barras de fronteira, tanto as já existentes, do elemento Y_{FF} , como as adicionadas pelo termo $(Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot Y_{EF})$, o qual representa justamente a malha equivalente oriunda do processo de eliminação da rede externa. Por sua vez, o termo de injeções também é composto pelas injeções pré-existentes nas barras de fronteira e pelo termo das injeções equivalentes. Nesse termo, o produto $Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1}$, que

Figura 15 – Região de interesse



Fonte: O autor (2022). Adaptado de (MONTICELLI, 1983, p.130)

multiplica as injeções da rede externa, representa os fatores de distribuição, necessários à correta representação das gerações dos nós eliminados. (MONTICELLI, 1983, p. 129-130). A Figura 15 ilustra a rede reduzida obtida.

Dessa forma, fica estabelecida, de maneira simplificada, a abordagem teórica à redução de sistemas. Entretanto, para que essa abordagem se torne computacional, é necessário contornar as inversões de matrizes, as quais podem se tornar proibitivas e ineficientes quando lidando com redes de elevado número de barras. Como já sugerido na Seção 2.2, há uma estreita relação entre equivalentes de rede e redução de matrizes, uma vez que se podem obter os mesmos resultados demonstrados ao aplicar redução de Gauss na matriz de (2.4.1) (MONTICELLI, 1983, p. 132-136). Ao aplicar esse algoritmo para as primeiras colunas, a matriz Y_{EE} tornar-se-á uma matriz

triangular superior, denominada U_{EE} , e a matriz Y_{FE} será zerada, dando origem a um sistema cujas duas últimas equações são desacopladas da primeira, tal como a seguir:

$$\begin{bmatrix} U_{EE} & Y'_{EF} & O \\ O & Y_{FFeq} & Y_{FI} \\ O & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E}_E \\ \vec{E}_F \\ \vec{E}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{I}'_E \\ \vec{I}_{Feq} \\ \vec{I}_I \end{bmatrix} \quad (2.4.6)$$

O termo Y_{FI} não é alterado, por conta da submatriz superior a ele ser nula e os termos Y_{IF} e Y_{II} também não são alterados, já que não se realizou nenhuma operação nessas linhas. O subsistema 2×2 desacoplado é igual ao da equação (2.4.4), apenas tendo sido obtido por uma metodologia distinta. Essa abordagem matricial linear ao método de Ward, conforme desenvolvida até aqui, parte do princípio já estabelecido de que as injeções de corrente oriundas das gerações da rede externa permanecem constantes. Cumprida essa condição, a resposta do sistema equivalente seria exatamente igual à do original.

Entretanto, em situações de alterações na rede interna, como no caso de contingências, certamente haverá modificações na corrente fornecida pelas fontes, a fim de que se possa ter o suporte de reativos necessário à manutenção dos níveis de tensão adequados nas barras da rede interna. Sob essa ótica, o modelo linear não é tão fidedigno, de modo que é mais adequado tratar a situação, no contexto de fluxo de potência, com base no que se desenvolveu na Seção 2.3, em que passam a ser definidas não mais injeções de corrente especificadas, mas injeções de potência e módulos de tensão, de acordo com o tipo de barra, tal como já descrito na seção anterior. Portanto, o problema passa a ser tratado de maneira não linear, uma vez que, para o cálculo das injeções nas barras de fronteira, são utilizadas as equações em (2.3.32) com as variáveis de estado da rede original, conforme as equações (MONTICELLI, 1983, p. 136-137):

$$\begin{cases} P_k^{eq} = V_k^0 \cdot \sum_{m \in K} V_m^0 \cdot (G_{km}^{eq} \cos(\theta_{km}^0) + B_{km}^{eq} \text{sen}(\theta_{km}^0)) \\ Q_k^{eq} = V_k^0 \cdot \sum_{m \in K} V_m^0 \cdot (G_{km}^{eq} \text{sen}(\theta_{km}^0) - B_{km}^{eq} \cos(\theta_{km}^0)) \end{cases} \quad (2.4.7)$$

Em que os termos de condutância e susceptância equivalentes são obtidos da matriz admitância equivalente, por sua vez, calculada da mesma maneira que para o método linear.

$$G^{eq} + jB^{eq} = Y^{eq} = \begin{bmatrix} Y_{FFeq} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \quad (2.4.8)$$

Para obtenção das potências da equação (2.4.7) por meio de simulações computacionais, executa-se o fluxo de potência para a rede reduzida uma vez para cada barra de fronteira, considerando-as como referência, cada uma na simulação correspondente, e utilizando como valores especificados as tensões e ângulos do caso base. As potências equivalentes injetadas são as somas das injeções positivas menos as negativas.

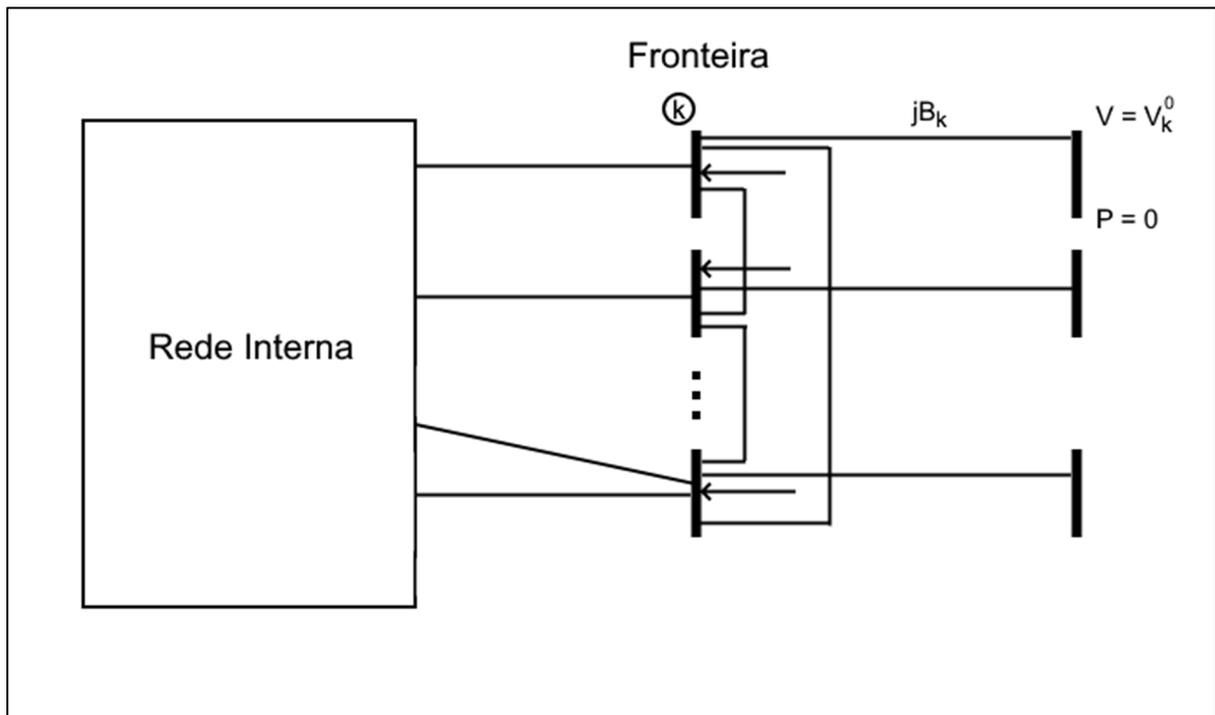
Em algumas situações, principalmente quando as cargas são modeladas como admitâncias constantes, a redução da matriz admitância para obtenção da matriz equivalente pode resultar em admitâncias *shunt* equivalentes muito elevadas nas barras de fronteira, e, portanto, em elevadas injeções de potência, tais como calculadas em (2.4.7). Essa situação, que também pode ser agravada por outros elementos, como capacitores e reatores, dificulta a convergência dos algoritmos de fluxo de potência além de prejudicar a precisão dos resultados, de forma que convém, para os casos em que isso ocorre, desconsiderar os elementos *shunt* da região externa antes de realizar a redução (MONTICELLI, 1983, p. 138).

Mesmo utilizando uma abordagem não linear, embora mais adequada ao contexto de fluxo de potência, ainda permanece a questão do suporte de reativos da rede externa, uma vez que, no método descrito, mesmo que haja a simulação das reações da rede externa por meio das ligações do sistema equivalente nas barras de fronteira, ainda permanecem constantes as injeções de potência nessas barras. Em geral, os resultados obtidos com esse tipo de equivalente são suficientemente precisos para potências ativas, mas não tanto para as potências reativas, mais uma vez por conta de não se representar o suporte reativo dos geradores externos, ou, no contexto não-linear estabelecido, das barras PV.

É para contornar essa limitação que foram propostas extensões ao método de Ward (MONTICELLI, 1983, p. 139-147), as quais são voltadas à representação das barras PV da região externa. Um contorno imediato ao problema seria a retenção de barras desse tipo na região externa que estivessem próximas à fronteira. De uma maneira mais geral, entretanto, pode-se representar o suporte externo de reativos por meio de barras PV fictícias ligadas às barras de fronteira, sendo esse o método

denominado de método de Ward estendido. A cada barra de fronteira corresponderá uma barra PV fictícia com tensão especificada igual à tensão da barra de fronteira correspondente e potência ativa especificada nula. A ligação é feita por meio de uma susceptância, tal como ilustra a Figura 16. Com essa configuração, só haverá fluxo de reativos envolvendo as barras fictícias quando as alterações realizadas na rede interna resultarem em mudanças no estado das barras de fronteira.

Figura 16 – Equivalente de Ward estendido



Fonte: O autor (2022). Adaptado de (MONTICELLI, 1983, p.143)

Considerando uma variação de ΔV_k na tensão da barra k , na fronteira, a injeção de reativos é dada por (MONTICELLI, 1983, p. 144)

$$\Delta Q_k = V_k \cdot B_k \cdot \Delta V_k \quad (2.4.9)$$

A susceptância B_k é oriunda da matriz que relaciona fluxo de potência reativa com os módulos das tensões na solução do fluxo de potência pelo método desacoplado rápido, chamada B'' . De maneira simplificada, essa matriz tem o mesmo formato da matriz susceptância completa do sistema, mas sem as linhas e colunas correspondentes às barras PV e à barra de referência (MONTICELLI, 1983, p. 101). O termo utilizado é, então, o termo da diagonal principal da matriz B'' reduzida

correspondente à barra k . O processo de redução é semelhante ao utilizado para a matriz admitância, eliminando-se as barras correspondentes à região externa.

Utilizando esse método atinge-se uma melhor acurácia na representação da rede e nos resultados de simulações de fluxo de potência em situações de contingências na rede interna. Ficam, então, explicadas as ideias principais que embasam o funcionamento da ferramenta de equivalentes do ANAREDE.

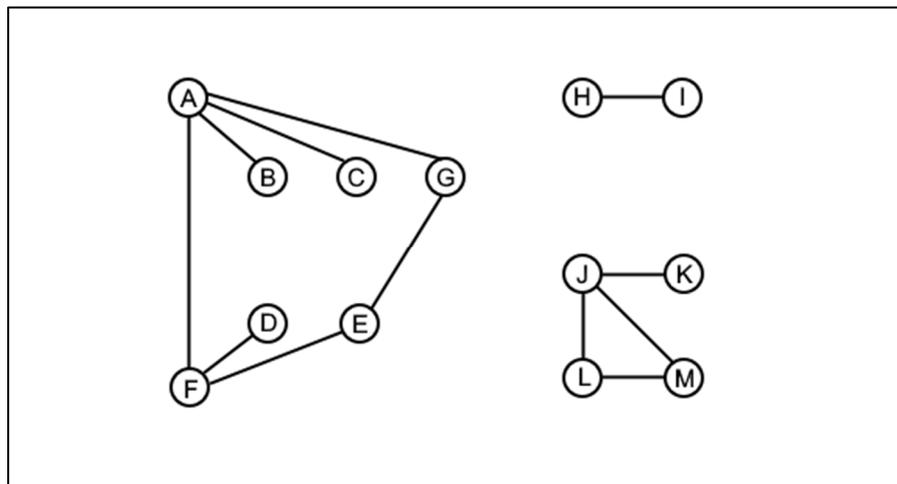
2.5 GRAFOS: ALGORÍTMOS DE BUSCA

Esta seção tem como objetivo apresentar brevemente dois algoritmos de busca em grafos, um dos quais é utilizado para implementação da solução ao problema proposto, conforme está descrito no Capítulo 4. A ideia de utilizar teoria de grafos para a solução do problema, reformulando a metodologia de seleção de barras, surgiu tendo-se em vista a conveniência de escolher como região interna do sistema um conjunto de barras conexo, tal como argumentado no Capítulo 3. O objetivo desses algoritmos de busca é visitar todos os nós do grafo em questão, de maneira sistemática, começando a partir de um determinado nó, de forma que se obtenha uma lista com a sequência dos nós encontrados no decorrer do processo. Ora, uma lista como essa, e qualquer fração dela, representa um subgrafo conexo do grafo principal, uma vez que um nó desconhecido só poderá ser visitado a partir de um nó já anteriormente visitado. Essa prerrogativa se encaixa perfeitamente nas necessidades deste trabalho, mas, levando em conta que o equivalente obtido ao final do processo se prestará à análise de uma barra, ou um conjunto de barras, de interesse, no entorno da qual deverá estar representada em detalhes a rede, a fim de garantir a acurácia dos resultados em aplicações de fluxo de potência, ou mesmo em outras aplicações, como em transitórios, ainda há outra condição de contorno: a rede interna obtida, ou seja, o subgrafo selecionado pelo algoritmo de busca, deve conter um entorno da barra de interesse. Em outras palavras, a barra de interesse não deve estar muito próxima da fronteira da região escolhida.

Dentre os dois algoritmos a serem introduzidos, a busca em largura e a busca em profundidade, apenas o primeiro atende a essas duas condições, sendo, portanto, mais adequado aos propósitos deste trabalho. Antes de explicar os algoritmos, é importante apresentar também a forma de representação dos grafos utilizada, dentre as várias existentes. De maneira geral, todas essas representações organizam, de

alguma forma, a informação de como são as ligações entre os nós dessa estrutura, ou seja, quais nós estão ligados entre si (SEdgeWICK, 1990, p. 418-423). Uma maneira de fazer isso é por meio de uma matriz adjacência, a qual é uma matriz quadrada de ordem igual ao número de nós do grafo e cujas entradas são binárias. Se dois nós do grafo estão ligados, o elemento da linha correspondente a um dos nós e da coluna correspondente ao outro é unitário. Por definição, os elementos da diagonal principal também são unitários. As demais entradas, correspondentes a pares de nós não ligados são nulas. É imediato que a matriz adjacência é simétrica. Para ilustrar a definição, a matriz de adjacência do grafo da Figura 17 é apresentada a seguir.

Figura 17 – Grafo exemplo

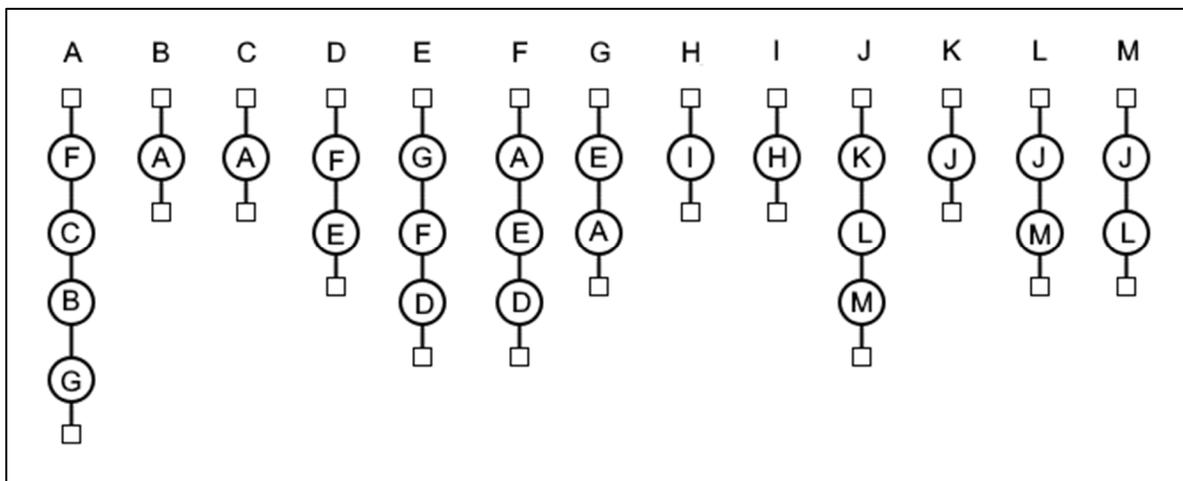


Fonte: O autor (2022). Adaptado de (SEdgeWICK, 1990, p.416)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
A	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
B	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
F	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
G	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
H	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1

Outra maneira de representar um grafo é através de estruturas de adjacência. Cada campo dessas estruturas corresponde a um determinado nó e contém as identificações de todos os nós ligados a esse nó. Claramente, como um ramo do grafo liga somente dois nós, se um nó aparece na lista de adjacência de outro, este outro deverá aparecer na lista do primeiro. Dizendo de outra maneira, cada ramo do grafo é representado duas vezes, uma em cada lista de adjacência dos nós que interliga. A estrutura de adjacência do grafo exemplo é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Estrutura de adjacência do grafo exemplo



Fonte: O autor (2022). Adaptado de (SEdgeWICK, 1990, p.422)

Outras representações, como as matrizes incidência podem também ser utilizadas, mas dentre as duas apresentadas, a representação por matriz de adjacência é mais adequada para grafos densos e a representação por estrutura de adjacência é mais adequada para grafos esparsos (SEdgeWICK, 1990, p. 420). Sendo assim, optou-se por utilizar a representação a partir de estrutura de adjacência, já que as redes elétricas são, em geral, esparsas.

Utilizando essa representação, pode-se entender a lógica dos dois algoritmos de busca utilizando o grafo exemplo da Figura 17. O algoritmo da busca em profundidade (SEdgeWICK, 1990, p. 423-430) tem como passo genérico verificar a lista de adjacência de um determinado nó e visitar o primeiro nó dessa lista que ainda não foi visitado, analisando, no passo seguinte, a lista desse nó. Repete-se o processo, até que todos os nós sejam visitados. Suponha-se que o nó inicial seja o nó A do grafo exemplo. Ao verificar a lista de adjacência, o nó F será o próximo a ser

visitado. Em sequência, verificando a adjacência de F, o primeiro nó é A, já conhecido e, portanto, visita-se o segundo nó, E. Observando a lista desse nó, o próximo nó a ser visitado é G. Na lista desse nó, entretanto, somente há dois nós visitados, de modo que o algoritmo volta para a lista anterior, de E, e visita o nó D, uma vez que G e F já são conhecidos. Na lista do nó D também só há nós conhecidos, de modo que o algoritmo volta para verificação das listas na sequência inversa à que foram abertas, em busca de um nó não conhecido. Como as listas de E e F já estão completamente visitadas, volta-se à lista de A e visita-se B, cuja lista só tem A e, portanto, já fica completamente visitada, e depois C, que apresenta o mesmo comportamento.

Sendo assim, todas as listas da porção conexa maior do grafo exemplo foram completamente verificadas por nós ainda não visitados, de modo que todos os nós dessa porção foram visitados. Recapitulando, a ordem de descoberta dos nós foi: AFEGDCB. Como se viu, esse método vai abrindo as listas de adjacência e não as verifica uma por vez, mas vai aprofundando a busca e voltando às listas anteriormente abertas à medida em que se completam as mais recentes.

Em contrapartida, a busca em largura (SEDGWICK, 1990, p. 430-434) verifica uma lista por vez, tendo como passo genérico visitar todos os nós de uma lista que ainda não tenham sido visitados e aplicar esse mesmo passo para as listas correspondentes a esses nós, até que todo o grafo seja reconhecido. Para o grafo exemplo, iniciando mais uma vez a partir do nó A, tem-se a sequência de passos: visitam-se os nós F, C, B, e G, os quais formam a primeira vizinhança de A, ou nível 1. Em seguida, a lista de F é aberta e são visitados os nós E e D. Estes, por sua vez são adicionados à fila de nós a serem visitados após o nó G. Prossegue-se à abertura da lista de C, que não tem nenhum nó desconhecido. O mesmo ocorre para B. Agora a lista de G é verificada e também não há nós desconhecidos. A partir daí, fica estabelecida a segunda vizinhança de A como os nós E e D, cujas listas são visitadas em seguida. Não sendo encontrados nós desconhecidos, o algoritmo finaliza sua execução. Recapitulando, a sequência de descoberta dos nós foi: AFCBGED. Conforme mostrado, esse método vai realizando uma busca por nível de adjacência. Ao verificar a lista de A, definiu-se o nível 1, dos nós vizinhos ao nó A e, verificando as listas desses nós, definiu-se o nível 2, que são os nós vizinhos aos do nível 1, excluindo-se A.

Em suma, a busca em profundidade vai acumulando as listas menos profundas e visitando as mais profundas até que se completem. Dessa forma, completa a

verificação das listas da mais profunda para a menos profunda. A busca em largura, por sua vez, visita completamente as listas dos nós de acordo com uma sequência, ou uma fila, ordenada por nível de vizinhança com o nó principal. Primeiro são visitados todos os nós do nível 1, depois todos os do nível 2 e etc. Sendo assim, para o propósito de selecionar uma região no entorno do nó inicial, a busca em largura proporcionará um resultado mais condizente, uma vez que prioriza na sequência de busca nós que estejam mais próximos do nó inicial.

Um exemplo bastante simples poderá confirmar isso. Suponha-se que da porção maior do grafo exemplo se queira definir um subgrafo com apenas 5 dos 7 nós, sendo esses os primeiros encontrados pelo procedimento de busca. Se utilizada a busca em profundidade, de acordo com a sequência obtida, o subgrafo será composto pelos nós A, F, E, G, e D. Em contrapartida, se utilizada a busca em largura, o subgrafo será formado pelos nós A, F, C, B, e G. No primeiro caso dois nós vizinhos ao nó A não são escolhidos, enquanto que no segundo todos os nós vizinhos ao nó inicial são incluídos no subgrafo.

Voltando ao contexto de sistemas elétricos e do objetivo deste trabalho, para selecionar 120 barras dentre cerca de 10000 do sistema completo, certamente o uso da busca em profundidade produziria uma lista cujo subconjunto das primeiras 120 barras não conseguiria sequer atingir a profundidade máxima e iniciar o retorno às adjacências da barra inicial, de modo que muito provavelmente essa própria barra seria uma barra de fronteira, uma vez que barras vizinhas a ela possivelmente não seriam selecionadas para compor a região interna. Essa situação está longe de ser o ideal para elaboração de equivalentes, uma vez que é importante a representação detalhada da região no entorno da barra de interesse. Sendo assim, escolheu-se o método da busca em largura para implementação dos algoritmos neste trabalho.

Outra observação importante desta seção é a de que nenhum dos dois métodos engloba na busca nós de subgrafos desconexos da porção a que o nó inicial pertence. Isso não é um defeito, mas o contrário, já que permite que se identifique justamente a conectividade do grafo principal, delimitando, a partir da sequência de nós proveniente do algoritmo de busca, quais são os nós do grafo principal que pertencem ao mesmo subgrafo, ou ilha, que o nó inicial e quais são os nós dos subgrafos das ilhas desconexas. Essa informação é utilizada no Capítulo 4 a fim de tratar os casos de estudo com respeito às ilhas elétricas do sistema.

3 INVESTIGAÇÃO DAS SITUAÇÕES PROBLEMA

A fim de facilitar o entendimento do funcionamento da ferramenta de equivalentes de rede e de isolar cada problema para entender suas causas, reproduz-se cada situação observada individualmente num caso de estudo a parte, utilizando um sistema menor. Iniciam-se as observações do comportamento do programa pelo caso apresentado na contextualização, quando foi constatada a possibilidade de retenção de barras escolhidas pelo usuário para eliminação, por motivos até então desconhecidos, contrariando as expectativas sobre os resultados. Ressalta-se que, quando da utilização da versão completa do programa, esse tipo de situação, a priori, não é um problema, uma vez que a presença de algumas barras adicionais que não se esperava que fossem retidas não prejudica simulações subsequentes. Porém, levando em conta o objetivo de se obter um equivalente de, no máximo, 120 barras é importante ter controle sobre a quantidade exata de barras que ficarão retidas, pois a presença de barras adicionais, a mais do que se esperava, pode inviabilizar o carregamento do arquivo com a rede reduzida na versão estudante do programa. Sendo assim, as observações subsequentes abordarão como utilizar a ferramenta e suas opções de modo a ter melhor controle sobre essa quantidade de barras retidas, entendendo os resultados obtidos à luz da teoria abordada no Capítulo 2.

3.1 RETENÇÃO DE BARRAS DA REDE EXTERNA

Retomando o que se apresentou na Figura 3 da Seção 1.1, obtida utilizando o caso do (PAR/PEL) 2022-2026 Verão 2022/2023 LEVE, ao solicitar a eliminação das barras das áreas 101 a 212; das áreas 213 a 256, exceto as barras de nível de tensão 500kV; e das barras com nível de tensão 345kV e 440kV que estão contidas no intervalo da área 257 a 303, uma barra da área 202 e uma da 204 permanecem, quando utilizada a opção FINT. Para entender o porquê desse comportamento, é necessário avaliar a configuração da rede no entorno dessas barras antes e depois da execução da ferramenta de equivalentes. Antes disso, porém, é importante introduzir a utilização da ferramenta de equivalentes de uma maneira mais prática, desvincilhada da interface gráfica do programa, e que consiste da utilização de um

arquivo de texto escrito no formato adequado ao comando de execução EXEQ (CEPEL, 2021, p.2-136), mostrado na Figura 19, o qual poderá ser carregado no programa, produzindo o mesmo resultado obtido a partir da entrada pela interface mostrada na Figura 3. Dessa maneira agiliza-se o processo de repetir a operação de equivalentes com igual seleção de barras utilizando opções diferentes.

Figura 19 – Cartão EXEQ do exemplo inicial

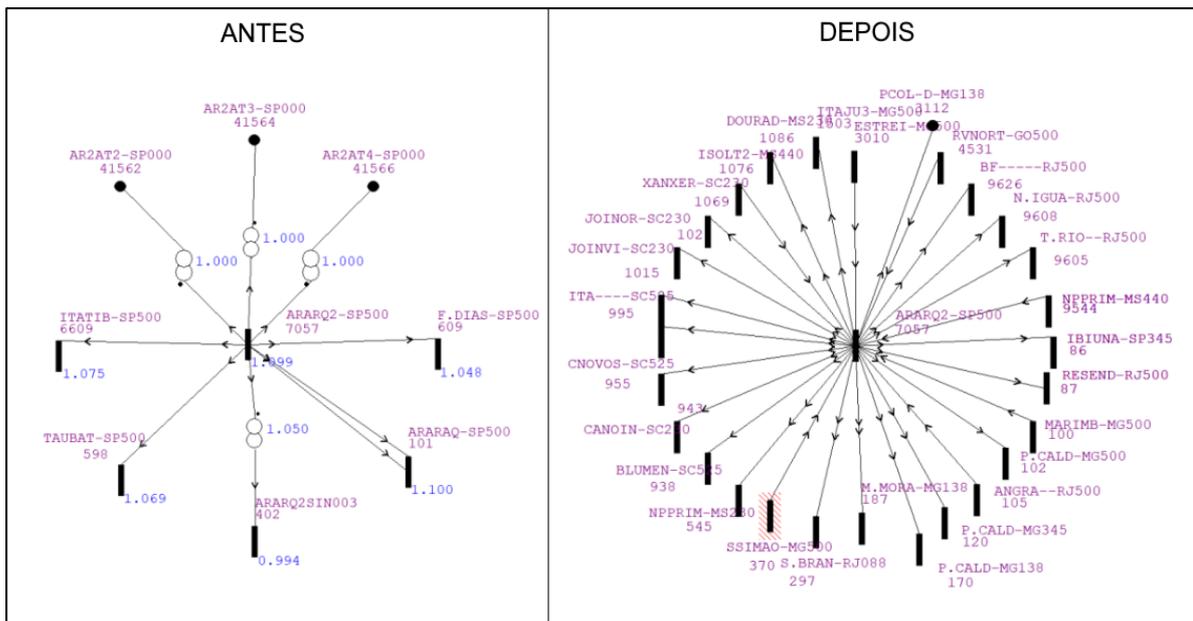
```

01 | EXEQ FINT
02 | (      1      2      3      4      5      6      7      8
03 | (234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
04 | (op) (tp) (no ) C (tp) (no ) C (tp) (no ) C (tp) (no )
05 | ELIM AREA 101 A AREA 212
06 | ELIM AREA 213 A AREA 256 X TENS 500
07 | ELIM AREA 257 A AREA 303 S TENS 345 E TENS 440
08 | 99999
09 | FIM

```

Fonte: O autor (2022)

Figura 20 – Entorno da barra 7057 antes e depois da obtenção do equivalente



Fonte: O autor (2022)

Voltando ao caso em questão, após obter o equivalente, uma barra da área 202 e outra da área 204, áreas estas que deveriam ter sido eliminadas por completo, permanecem retidas, conforme já comentado, sendo essas as barras 7057 e 86, respectivamente. O entorno da primeira barra, anteriormente e posteriormente à operação, é mostrado na Figura 20. Na situação inicial, ao examinar cada uma das barras vizinhas, verifica-se que todas são da área 202. Já na situação final, observa-

se que nenhuma das barras desse entorno são da área 202, sendo a grande maioria de áreas distintas entre si. Curiosamente, dentre as barras presentes está também a própria barra 86. Não há nenhum empecilho teórico para a remoção dessas duas barras. A partir da situação mostrada na parte direita da Figura 20, a eliminação da barra 7057 acarretaria o estabelecimento de ligações entre as barras de seu entorno, de maneira muito semelhante a uma transformação estrela-malha, tal como já discutido no Capítulo 2. Verificou-se, entretanto, que tanto a barra 7057 como a barra 86 são ligadas a extremidades de elos CC e por isso não puderam ser removidas, uma vez que o algoritmo de redução do método de Ward estendido não trata dessas ligações por elo de corrente contínua. Desse modo, fica documentado uma das razões para a retenção de barras da rede externa: a presença dos elos CC. Não necessariamente a região de interesse escolhida para o equivalente conterá tais ligações, de modo que é inconveniente para os propósitos estabelecidos que se mantenham essas barras. O contorno desse problema é abordado no Capítulo 4, quando da implementação da nova metodologia proposta.

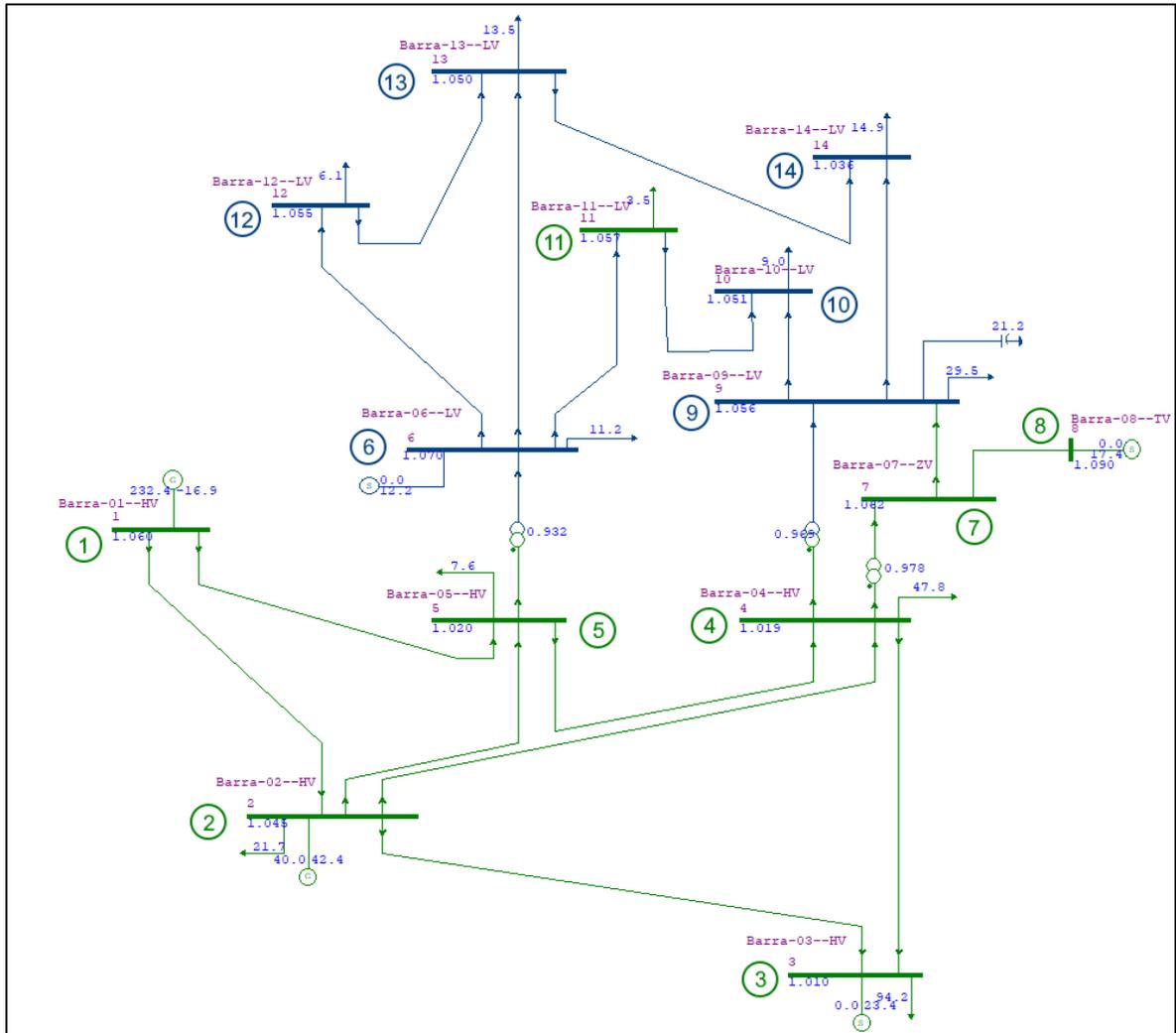
Agora, é interessante analisar também o que ocorre quando não se utiliza a opção de fronteira interna. Antes disso, porém, é importante esclarecer, para conformidade com as definições adotadas na Figura 6 do capítulo 2, que o programa não define as regiões de fronteira, externa e interna em um único passo. De acordo com a entrada fornecida, o usuário define duas regiões: a que será eliminada e a que será mantida. No manual do ANAREDE, essas regiões são chamadas livremente de “externa” e “interna”, respectivamente, embora nesse primeiro passo ainda não se tenha definido a fronteira, de modo que ainda há ligações diretas entre barras dessas regiões. As aspas serão utilizadas para evitar confusão a esse respeito, denominando essas duas regiões definidas inicialmente pelo programa e diferenciando-as das regiões externa e interna propriamente ditas.

Quando não se usa a opção FINT, a fronteira é formada por barras da rede “externa”, de modo que se espera que haja uma retenção expressiva de barras dessa região. Para verificar isso basta repetir o procedimento anteriormente realizado desmarcando a opção FINT na interface ou carregando o cartão EXEQ sem a palavra FINT ao lado do nome do cartão, como mostrava a Figura 19. Observando a barra de busca por área, nota-se que permanecem barras de 9 das 17 áreas que deveriam ter sido eliminadas pela primeira cláusula do arquivo carregado. Note-se que as áreas não têm numeração sequencial, ou seja, nem todos os números correspondem a uma

área. O intervalo da área 101 a 212, não contém 112 áreas, mas apenas 17, pois é composto pelas áreas 101 a 105 e 201 a 212.

Para entender melhor as diferenças entre as duas opções, reproduz-se a situação no sistema IEEE14 dividido em duas áreas: a área 1, formada pelas barras 6,9,10,12,13 e 14 e a área 2 formada pelas restantes. Na Figura 21, a área 1 está

Figura 21 – Rede IEEE14

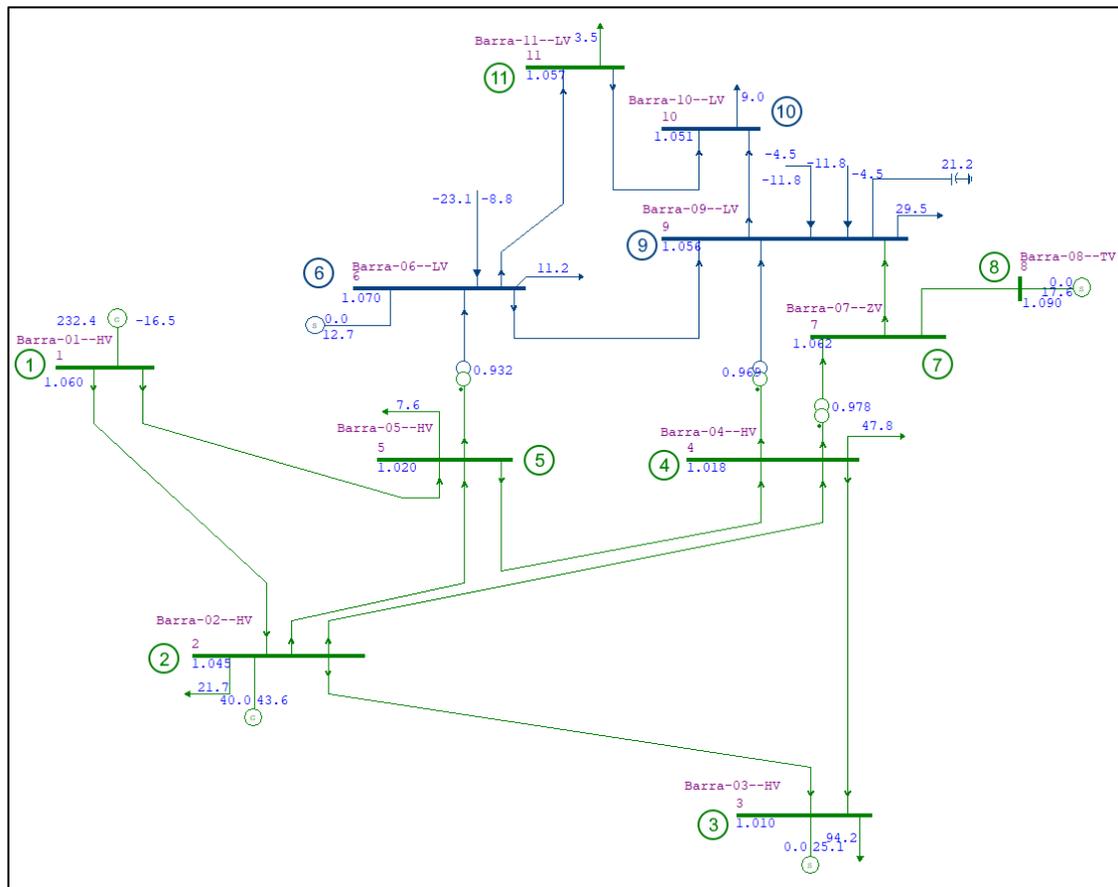


Fonte: O autor (2022)

representada em azul e a 2, em verde, o que foi feito, para facilitar a visualização, definindo grupos base de tensão distintos para cada área, já que não há opção de coloração por área. Eliminando a área 1, o que se espera teoricamente, considerando fronteira interna, é que todas as barras azuis sejam eliminadas e que sejam estabelecidas as injeções equivalentes na fronteira e impedâncias equivalentes entre as barras dessa fronteira, de modo que a barra 11 ficaria ligada às barras 5, 4 e 7 e a barra 7, às barras 4 e 5. Mas o que ocorre quando não se usa a opção FINT é a

retenção das barras 6, 9 e 10, as quais são consideradas pelo programa como as

Figura 22 – Rede IEEE114 reduzida sem opção FINT



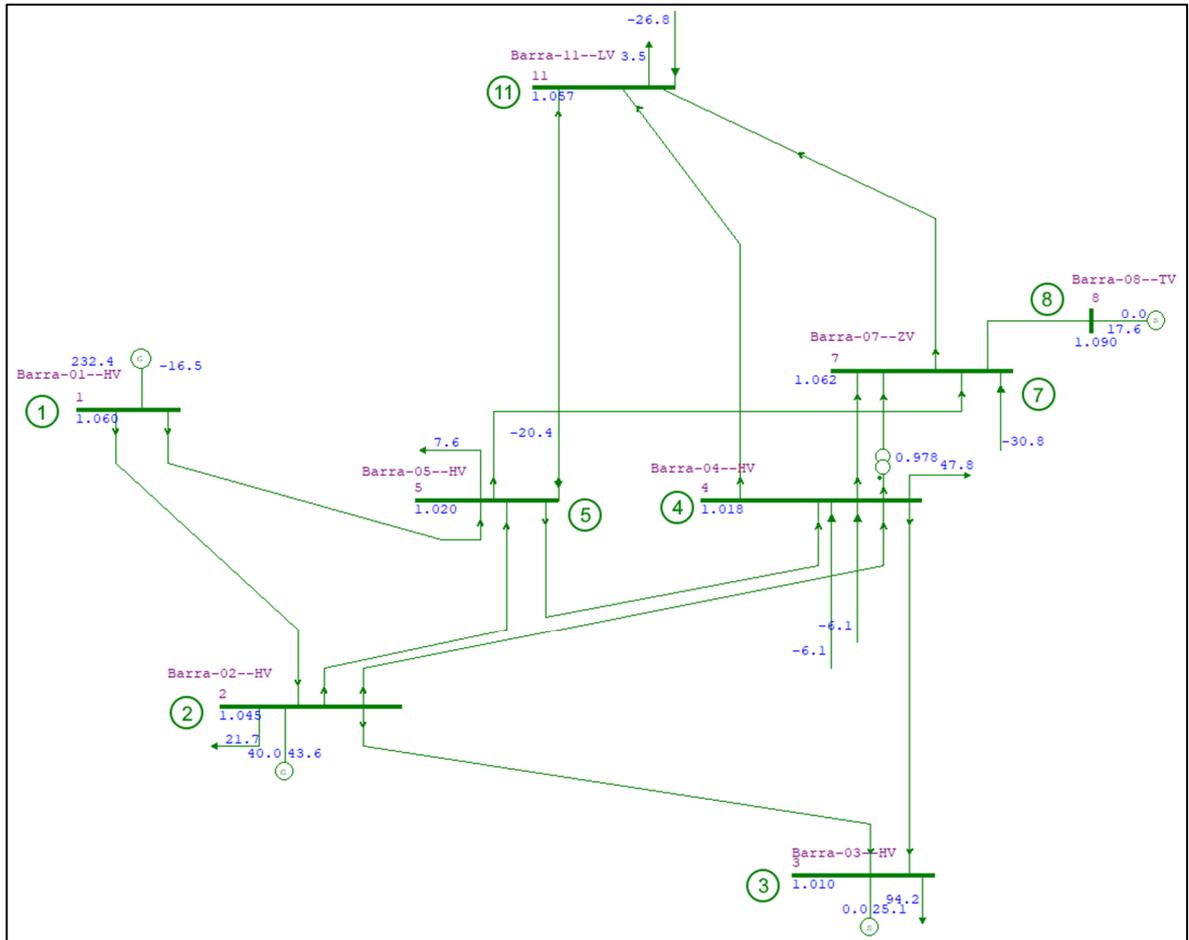
Fonte: O autor (2022)

barras de fronteira, conforme mostra a Figura 22. Portanto, nessa situação, são consideradas como fronteira as barras da região “externa” que estejam ligadas diretamente a alguma barra “interna” e ocorre também o comportamento esperado nessas barras, com adição de injeções na fronteira e de uma impedância entre as barras 6 e 9, que representa o caminho que existia entre essas duas barras no circuito original.

Realizando a mesma eliminação, mas agora com a opção FINT, obtém-se a rede mostrada na Figura 23, conforme já discutido, com um resultado mais intuitivo, uma vez que todas as barras externas são eliminadas e a fronteira é definida pelas barras 4, 5, 7 e 11. Fica evidente, portanto, que, para o propósito deste trabalho, adequa-se melhor o uso da fronteira interna, que tem uma definição análoga e complementar à da externa, uma vez que é definida como o conjunto de barras “internas” que têm ligação direta com alguma barra “externa”. Desse modo, é possível

controlar melhor a quantidade de barras no sistema resultante ao utilizar essa opção, pois as barras de fronteira já serão contabilizadas ao escolher a região “interna” da

Figura 23 – Rede IEEE14 reduzida com opção FINT



Fonte: O autor (2022)

rede. Por isso, utiliza-se essa opção quando da implementação do método de obtenção da rede reduzida com 120 barras.

Um detalhe interessante na Figura 23 permite que se observe como o programa representa impedâncias equivalentes entre barras com níveis de tensão distintos, conforme se pode avaliar pela impedância equivalente entre as barras 4 e 7, que fica em paralelo com um transformador. Como se vê, o programa representa essa impedância tal como as demais. A princípio isso pode parecer estranho, mas, na representação matricial do sistema, tal como desenvolvida na seção 2.3, os termos correspondentes aos transformadores acabam sendo representados como admitâncias, conforme explicitado na equação (2.3.29). Claro, as admitâncias correspondentes aos transformadores têm influência do valor de seu tap, mas uma

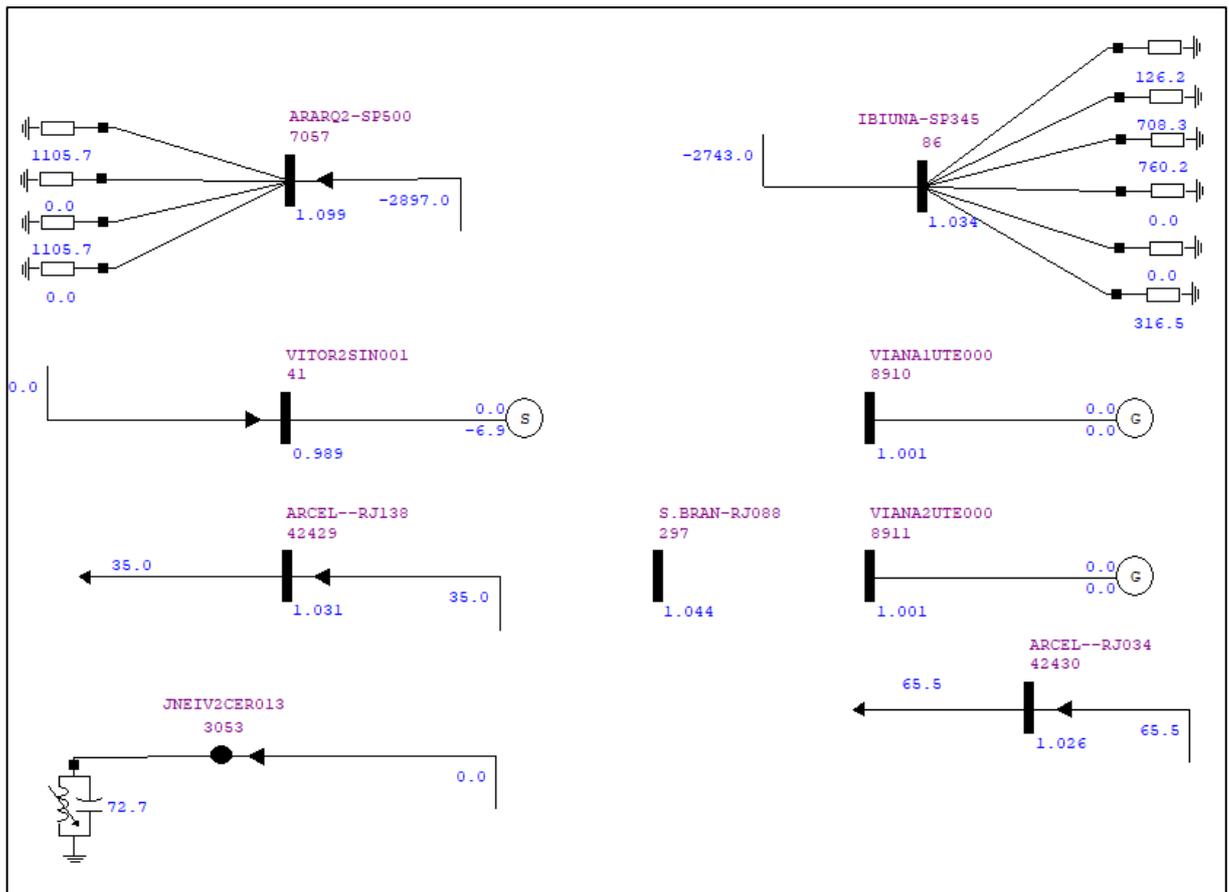
vez expressas como admitâncias e realizado o processo de redução matricial, não há como, somente a partir do valor de impedância obtido, definir um valor que seria de um possível tap do transformador do ramo equivalente em questão. Ou seja, o programa trata como se entre as duas barras existisse um transformador com tap unitário, que, em um circuito no sistema por unidade, pode ser simplesmente omitido.

3.2 FORMAÇÃO DE ILHAMENTOS NA REDE INTERNA

Nas simulações da seção anterior o método utilizado para obtenção dos equivalentes foi o de Ward estendido, que é o método normalmente aplicado pelo programa (CEPEL, 2021, p.1-12). Conforme já discutido na fundamentação teórica, esse método representa não só injeções de potência nas barras de fronteira, mas também simula a reação da rede externa em resposta a mudanças na rede interna por meio das impedâncias de transferência entre as barras de fronteira e, além disso, pela simulação do suporte de reativos das barras PV eliminadas. No algoritmo do ANAREDE, a redução da matriz admitância do sistema para obtenção das impedâncias série de transferência é feita desconsiderando os termos que representam os elementos shunt externos, para evitar o problema de formação de admitâncias shunt muito elevadas, tal como já dito. Além disso, é definida uma constante ZMAX que determina o máximo valor de impedância série permitido para elementos do circuito equivalente, desconsiderando-se as impedâncias com valor superior ao estipulado. Para representar o efeito de suporte de reativos, são calculadas admitâncias shunt por um procedimento análogo de redução matricial, mas agora considerando as admitâncias shunt e as barras de tensão controlada aterradas. Já para representar o suporte ativo das barras de geração, são calculados fatores de participação equivalentes para as barras de fronteira e internas, obtidos a partir dos fatores de geração das barras eliminadas, à semelhança do que se fazia quando da aplicação dos métodos analógicos. Por fim, para determinação das injeções equivalentes, é executado fluxo de potência, com os estados das barras de fronteira e das internas fixos, o que é feito designando essas barras como referências, conforme já apresentado. Há ainda uma opção para realizar esse processo mantendo os estados somente das barras de fronteira, a opção INJF. (CEPEL, 2021, p.1-12).

Entretanto, o programa também oferece outra opção mais simples para obter os equivalentes: a utilização do método de potência constante, por meio da opção PCTE. Nesse caso, determinam-se apenas as injeções equivalentes e os fatores de participação de geração equivalentes. Como se sabe, esse método não representa nenhum tipo de reação da rede externa a alterações na rede interna, oferecendo menor acurácia que o método anterior. Mesmo assim, pode ser usado em algumas situações mais simples e, portanto, cabe avaliar o comportamento do programa ao utilizar essa opção. Para isso, executa-se a operação de equivalentes sobre o caso do PAR/PEL até então utilizado como exemplo adicionando a palavra PCTE no cartão da Figura 19. Conforme já apresentado, a sequência de cláusulas dessa figura acaba por eliminar a barra de referência do SIN, que é a barra de ilha solteira, inviabilizando a execução do fluxo de potência, o que seria facilmente resolvido designando outra barra como referência.

Figura 24 – 9 ilhas com apenas uma barra

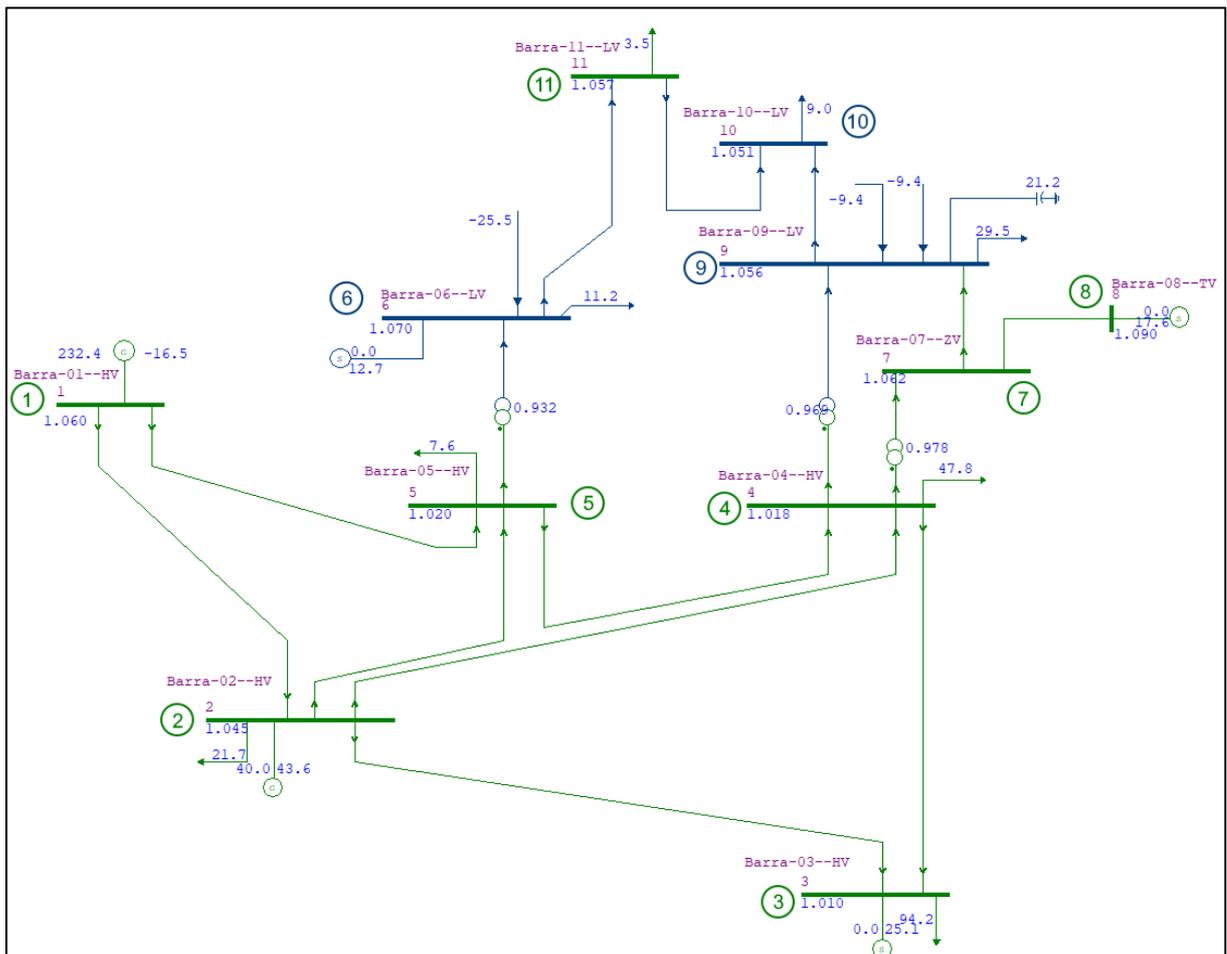


Fonte: O autor (2022)

Porém, ao utilizar o método da potência constante, mesmo após a escolha de outra referência, o erro de rede elétrica sem barra de referência permanece. Isso indica que há uma parte da rede desconectada da porção à qual a nova barra de referência pertence e que está sem barra de referência. Ou seja, a operação produziu mais de uma ilha elétrica, sendo necessário o estabelecimento de barras de referência em cada uma delas ou o desligamento das ilhas que não sejam de interesse. O próprio programa oferece uma opção, de nome ILHA, a qual, pode ser usada quando da execução do comando EXLF (fluxo de potência) para desligar automaticamente as ilhas sem barras de referência. (CEPEL, 2021, p.3-14). Sendo assim, basta denominar uma nova barra de referência na região de interesse e executar o fluxo de potência com essa opção.

É interessante executar o relatório de ilhamentos desprovidos de barras de referência, o que pode ser feito por meio da interface do programa ou carregando um

Figura 25 – rede IEEE14 reduzida com a opção PCTE

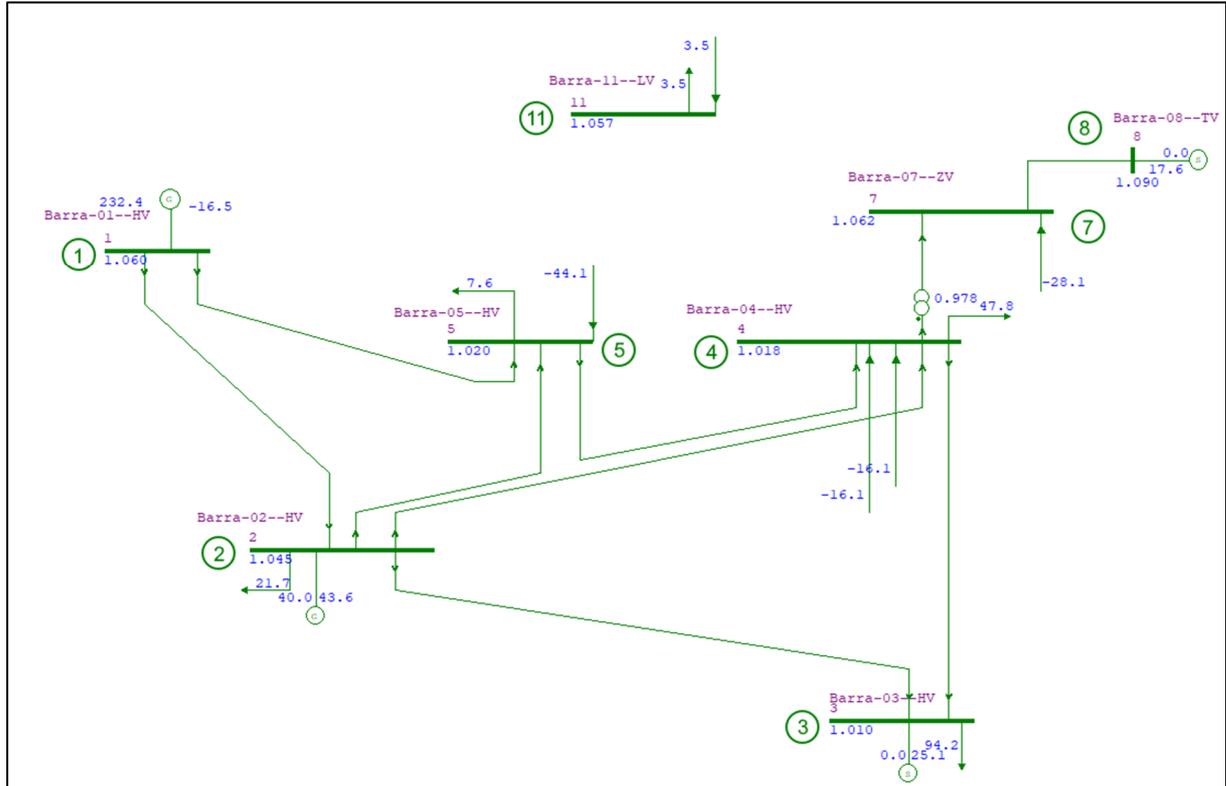


Fonte: O autor (2022)

arquivo com o comando RELA e a opção RILH (CEPEL, 2021, p.2-206, p.3-25). O relatório obtido logo após a execução da operação de equivalente, sem designar nenhuma nova barra de referência, lista 9 ilhas com apenas 1 barra, 1 ilha com 3 barras, 1 ilha com 16 barras e 2 ilhas maiores com elevado número de barras, perfazendo um total de 12 ilhas elétricas. Os casos mais curiosos são os das ilhas com apenas uma barra, dentre as quais encontram-se as já citadas barras 86 e 7057, de Ibiúna e Araraquara, que, como já se sabe, estão ligadas a extremidades de elos CC. Essas 9 ilhas estão mostradas na Figura 24.

Para entender com mais facilidade o que ocorre, segue-se novamente a premissa de isolar a situação em um caso de estudo menor. Para isso, utiliza-se o mesmo sistema IEEE14 apresentado na seção anterior, com a mesma divisão de áreas, para o qual analisa-se a eliminação da área 1, em azul, com a opção de potência constante habilitada em dois casos: sem e com a opção FINT. No primeiro caso, conforme o resultado mostrado na Figura 25, mais uma vez as barras 6, 9 e 10 são consideradas de fronteiras, dada a ausência da opção FINT, mas agora não há a

Figura 26 – rede IEEE14 reduzida com as opções PCTE e FINT

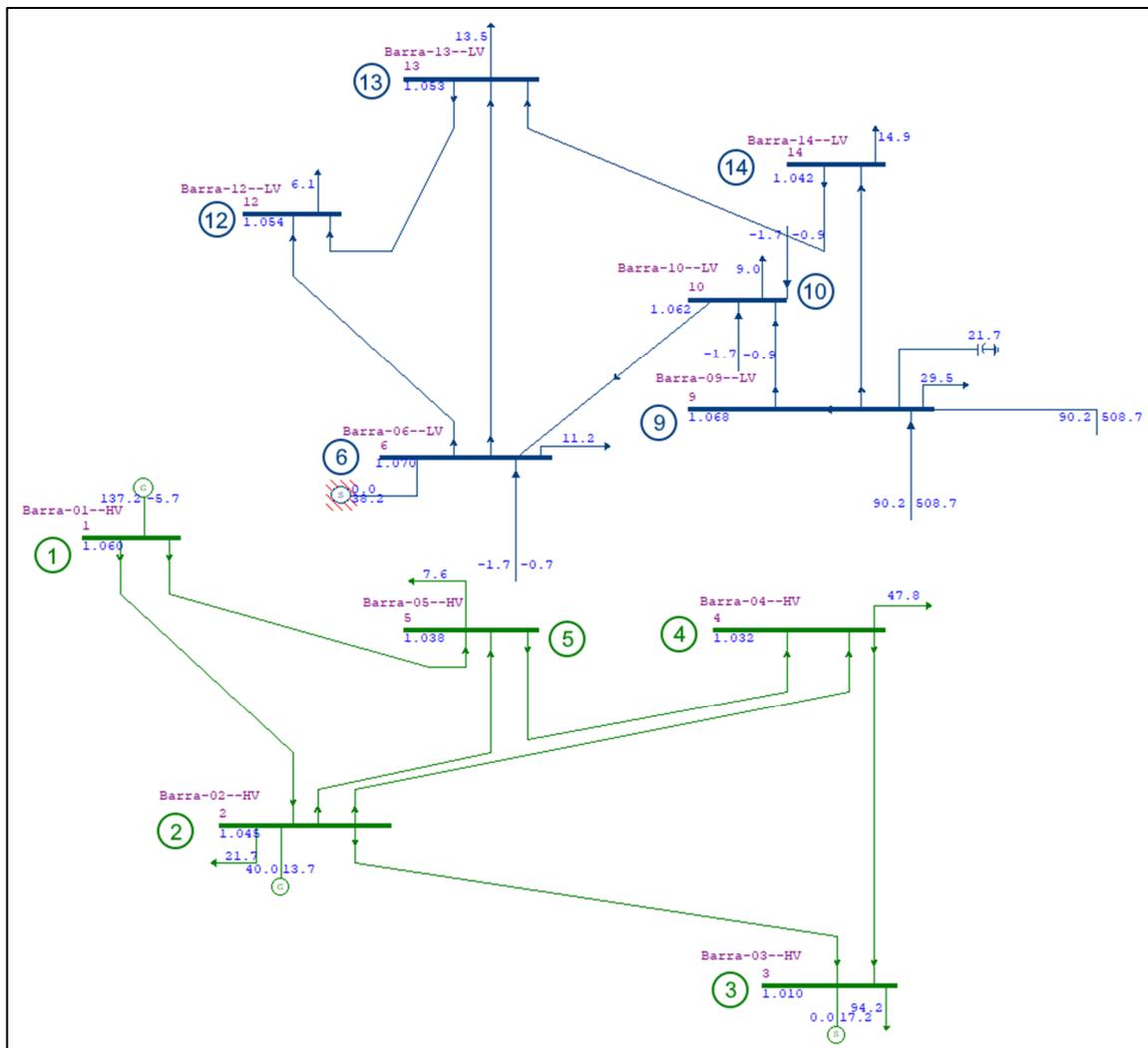


Fonte: O autor (2022)

uma diminuição da área de interesse para atender à restrição do máximo de 120 barras. Mais à frente, essa mesma problemática será abordada, ao propor a implementação do novo método de seleção de barras, que, como se vê, deverá vir aliado a operações de simplificação dos elos CC e de retirada de barras e elementos fora da região de interesse.

Na Seção 4.1, verifica-se que nos arquivos do PAR/PEL, que contemplam todo o SIN, há, na verdade, 4 ilhas elétricas. Portanto, é interessante analisar o comportamento da ferramenta de equivalentes no que diz respeito aos ilhamentos.

Figura 29 – Resultado da eliminação da área 2 na rede IEE14 modificada



Fonte: O autor (2022)

Para evitar utilizar informações discutidas nas seções seguintes, basta analisar um caso bem simples, modificado a partir do exemplo IEEE14 apagando os transformadores para que se formem duas ilhas, como mostra a Figura 27. Algumas

barras da área 2 ficaram na ilha superior, junto com as da área 1, somente para evidenciar o comportamento descrito a seguir: ao eliminar a área 1, usando a opção FINT, todas as barras azuis são eliminadas, sendo consideradas como barras de fronteira, por definição, apenas as barras 11 e 7, já que são as únicas da área 2 que tem alguma ligação com a rede externa. Dessa forma, apenas há impedâncias de transferência entre essas duas barras, conforme mostra a Figura 28. Curiosamente, ao realizar a operação complementar, escolhendo a área 2 como área externa para eliminação, o programa retorna o seguinte aviso: “Barras para eliminação dentro de ilha elétrica sem nenhuma fronteira com a rede interna serão retidas. Prevenção de diagonal nula em Y”. O resultado obtido é conforme avisado, com a ilha inferior permanecendo intacta, tal como na Figura 29 e apenas as barras 7 e 11 sendo eliminadas, visto que, são as únicas em contato com a rede interna, formada nesse caso pelas barras da área 1, em azul.

Esses dois exemplos mostram que o programa trata cada ilha de forma separada. Espera-se, inclusive, que se houvesse alguma barra da área 1 na ilha inferior, o programa, teria executado a eliminação dessa barra no primeiro caso e, no segundo, a eliminação das barras da área 2 nessa ilha. Ou seja, cada ilha teria definida sua região interna e externa como se os comandos tivessem sido executados separadamente para cada ilhamento. Além disso, fica claro que mesmo que se solicite a eliminação de uma área que contém uma ilha, as barras dessa ilha não serão eliminadas ou apagadas, o que é confirmado em qualquer dos exemplos com rede conexa ao tentar eliminar toda a rede, quando se obtém uma rede inalterada como resultado. Do ponto de vista estrito da aplicação do método de eliminação, de acordo com o que se explica na Seção 2.4, isso é esperado, uma vez que a matriz do sistema é, nesse caso, integralmente uma matriz de barras externas e a eliminação de Gauss se aplicará a todas as colunas, resultando numa matriz triangular superior. Ou seja, a matriz em questão torna-se somente a submatriz U_{EE} da equação (2.4.6), não sendo realizado com este procedimento nenhuma alteração nas demais submatrizes, que são nulas por definição. De acordo com a mensagem de aviso citada, de prevenção de diagonal nula em Y', provavelmente, o programa identifica a nulidade dessas submatrizes da região interna, que seriam a saída do algoritmo, e retém as barras da região externa para evitar subseqüentes operações com essas matrizes nulas.

Em suma, não há sentido em aplicar esse método de redução para eliminar toda a rede, ou, num caso menos extremo, eliminar completamente uma ilha da

rede. Mesmo assim, esse resultado é contraintuitivo, já que o usuário escolheu um sistema reduzido sem as barras daquela ilha. Apresenta-se, portanto, mais uma situação inconveniente para o propósito deste trabalho, sendo necessário o tratamento de reduções que resultem na permanência de ilhas indesejadas, como acontecerá ao escolher em um caso completo do SIN uma região de interesse numa dada ilha.

Diante do exposto nesta seção e na anterior, verificam-se como mais adequadas à finalidade de obtenção de um equivalente com número restrito de barras o uso da fronteira interna e do método de Ward estendido, a primeira porque evita retenção de barras da rede externa permitindo contagem exata das barras que serão retidas e o segundo por evitar a formação de ilhamentos, ao contrário do modelo de potência constante, além de fornecer resultados mais acurados. Somando a isso, é evidente a dificuldade de escolher uma região pequena e conexa apenas com as opções de área, nível de tensão e barra. A proposta desse novo método é simplificar a seleção de barras, de modo que dependa menos da entrada do usuário e possibilite inclusive a escolha automática de uma região conexa, evitando a formação de ilhamentos, mesmo se usada a opção PCTE, e a necessidade de alguns passos adicionais de tratamento do caso após a execução da ferramenta de equivalentes, conforme mostrado.

3.3 ERROS DE EXECUÇÃO

Antes mesmo de realizar a implementação de novo método de seleção de barras, convém avaliar o comportamento do programa quanto à eliminação de grande número de barras uma vez que, conforme se tem dito, não necessariamente a ferramenta de equivalentes foi pensada para a finalidade de produzir um equivalente

Figura 30 – Eliminação de todas as áreas exceto a 741

```

1  ▢ EXEQ FINT PCTE
2  | (           1           2           3           4           5           6           7           8
3  | (2345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
4  | (op) (tp) (no ) C (tp) (no ) C (tp) (no ) C (tp) (no )
5  | ELIM AREA 1 A AREA 724 E AREA 742 A 883|
6  | 99999
7  | FIM

```

Fonte: O autor (2022)

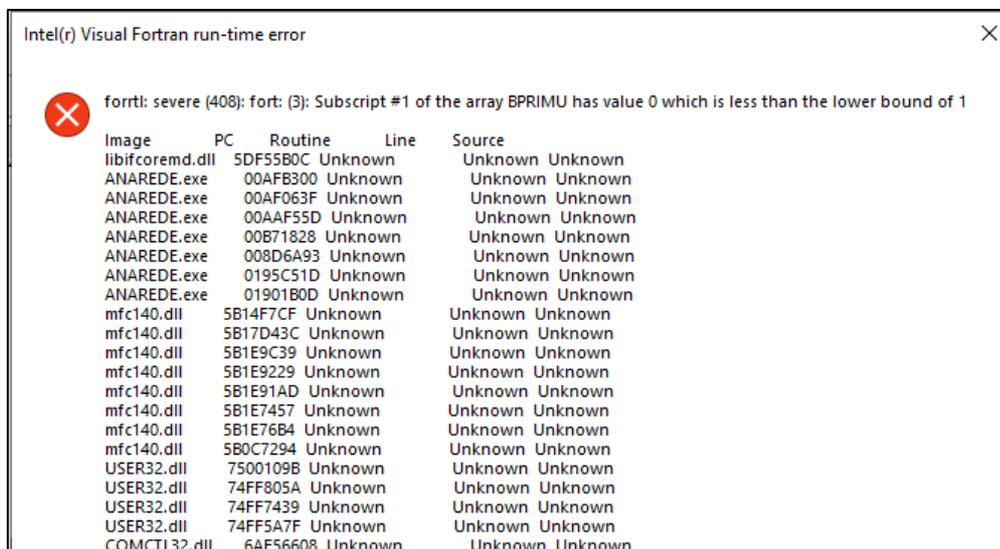
de rede de pequenas dimensões. Como primeira avaliação, é realizada a operação de eliminação de todas as áreas exceto uma dada área, por exemplo 741. Basta, para

isso uma única cláusula lógica, conforme mostra a Figura 30.

Ressalta-se que a numeração de áreas assim como a de barras não contempla todos os números em sequência, como já comentado. Antes de finalizar a execução, o programa para de funcionar e apresenta a mensagem de erro reproduzida parcialmente na Figura 31.

Como visto, isso não acontecia quando a área externa era menor, tal como nos exemplos mostrados até agora, o que pode indicar que há uma limitação com relação ao tamanho da região externa. A falta de uma mensagem de erro mais clara dificulta a determinação da causa desse problema, sendo a única pista, mostrada no início da

Figura 31 – Mensagem de erro



Fonte: O autor (2022)

mensagem de erro, sobre um subscrito de um elemento de um vetor, o qual deveria ser no mínimo 1 e é 0. Para entender o porquê desse problema, seria necessário acesso ao código da implementação do método de equivalente de Ward estendido utilizado pelo ANAREDE, o qual não é disponível de maneira aberta. Desse modo, o que se pode fazer é tentar contornar essa situação propondo uma redução por partes, ao invés de realizá-la de uma só vez.

4 ADAPTAÇÕES METODOLÓGICAS PARA CONTORNO DOS PROBLEMAS

As observações do capítulo anterior apontam a necessidade de tratamento prévio dos casos a serem reduzidos, além do desenvolvimento da nova metodologia de seleção de barras, como se propunha desde o início. Como se viu, é necessário também o tratamento dos elos CC, a fim de evitar retenção de barras CA que recebam potência proveniente dos elos, e a remoção de barras que porventura estejam desconectadas da ilha que contém a região de interesse. Este capítulo abordará inicialmente a proposição do novo método de seleção e, nas seções seguintes, as adaptações metodológicas necessárias à utilização da ferramenta de equivalentes do ANAREDE visando a obtenção de redes equivalentes com, no máximo 120 barras.

4.1 PROPOSIÇÃO DE NOVO MÉTODO DE SELEÇÃO DE BARRAS

No intuito de desenvolver um método de seleção que, tendo como entrada apenas uma barra da região de interesse e o tamanho dessa região, é natural que se tenha considerado a implementação utilizando grafos da rede elétrica, afinal a informação necessária para tanto é justamente dos nomes dos nós elétricos e das ligações entre eles. Ao contrário do método de seleção oferecido no ANAREDE, que, como se viu, requer cuidadosa escolha de grupos de barras e formação de conjuntos para definição adequada da região de interesse, a seleção do entorno da barra de interesse utilizando teoria de grafos permite que seja escolhido um conjunto de barras conexo, evitando que se formem ilhas elétricas caso se utilize a opção PCTE, por exemplo, e permite também melhor delimitação da quantidade de barras, característica essencial para possibilitar o uso da rede reduzida na versão estudante do programa.

Para chegar a selecionar corretamente a rede, entretanto, é necessário primeiro conseguir desenhar o grafo da rede elétrica do SIN, e, para isso, ler o cartão de entrada do ANAREDE, no formato .PWF e processar as informações. O desenvolvimento foi realizado separando cada etapa em funções e toda a implementação doravante apresentada foi feita utilizando o MATLAB. O código para leitura do arquivo foi desenvolvido previamente, e para outros usos, pelo professor

orientador, Prof. Dr. Vicente Simoni, tendo sido feitas algumas adições pelo autor deste trabalho, a fim de atender aos objetivos estabelecidos. Por ser um arquivo extenso, com cerca de 1000 linhas de código, optou-se por não apresentar explicitamente as linhas de comando, mas apenas o pseudocódigo. As demais funções, desenvolvidas integralmente pelo autor deste trabalho, encontram-se apresentadas nos apêndices.

Para se adequar à sintaxe dos cartões do ANAREDE, a função de leitura percorre o texto, linha a linha e avalia condicionalmente a cadeia de caracteres de cada linha da seguinte maneira:

- Caso a cadeia represente o nome de algum dos cartões, por exemplo 'DBAR', será atribuído 1 a um indicador binário correspondente ao cartão identificado e 0 aos demais, de modo que as próximas linhas sejam lidas de acordo com a sintaxe do cartão identificado;
- Caso a cadeia represente o símbolo de término de cartão, '99999', então a todos os indicadores é atribuído o número 0, de modo que na próxima linha nenhuma sintaxe específica será lida, mas apenas será identificado o próximo cartão; e
- Quando numa linha que esteja entre um nome de cartão e o símbolo de término, condições "if" garantem que somente a sintaxe do cartão em questão será aplicada a essa linha.

Ao ler uma linha de um determinado cartão, as informações são armazenadas em variáveis contidas em estruturas, as quais representam o conjunto de dados desse cartão. Especial atenção deve ser dispensada às colunas de cada linha, seguindo detalhadamente as descrições do manual do ANAREDE para armazenar cada informação a partir dos campos corretos.

De maneira sucinta, as principais estruturas de dados retornadas por essa função são: "*bus*", que contém os dados de barra, lidos do cartão DBAR; "*line*", que contém os dados de linha, lidos do cartão DLIN; e "*csc*", que contém os dados de compensadores série controláveis, lidos do cartão DCSC. No caso do cartão DBAR, as informações mais importantes para a aplicação dos algoritmos desenvolvidos são os números das barras, os nomes, o grupo base de tensão e o estado, que pode ser

ligada ou desligada. No caso dos dois outros cartões citados, as informações mais importantes são as barras “de” e “para” e os estados.

As estruturas “*line*” e “*csc*” são fundamentais para elaboração do grafo de rede, uma vez que representam justamente as ligações entre os nós do grafo, enquanto a estrutura “*bus*” serviu, na maior parte do tempo, como um banco de dados que relaciona os nomes das barras aos seus números e demais informações relevantes. Além das apresentadas, outras estruturas também foram utilizadas nas implementações subsequentes à montagem do grafo da rede:

- Para colorir o grafo de acordo com os níveis de tensão, foi utilizada também a estrutura “*tbg*”, que guarda as informações dos grupos base de tensão, lidas a partir do cartão DGBT;
- Para eliminação dos elos CC, foram utilizadas as estruturas “*elo*” e “*cbus*”, as quais guardam, respectivamente, as informações dos elos CC, lidas a partir do cartão DELO, e a as informações das barras CC, lidas a partir do cartão DCBA; e
- Para formação de grupos de agregadores, necessária ao passo final de resolução do problema, foi utilizada a estrutura “*agr*”, que contém as informações dos grupos de agregadores, lidas a partir do cartão DAGR;

Dentre as estruturas utilizadas para este trabalho, somente “*bus*” e “*line*” já se encontravam implementadas no código original, tendo sido adicionadas, pelo autor deste trabalho, as estruturas “*csc*”, “*tbg*”, “*elo*”, “*cbus*” e “*agr*”. Uma vez de posse dos dados da rede, pode-se prosseguir ao processamento das informações para elaboração do grafo. Numa primeira implementação, foram utilizadas funções próprias do MATLAB tanto para montagem do grafo como para seleção das barras retidas no sistema equivalente.

Para montar um grafo, basta fornecer à função “*graph*” do MATLAB duas listas de nomes de nós: a primeira com o nome dos nós de origem das ligações e a segunda, com o nome dos nós de destino (MATHWORKS, 2022a). As duas listas devem ser do mesmo tamanho, de modo que cada entrada da lista “de” forme um par com a entrada de mesmo índice da lista “para”. Ora, essa informação é justamente o que fornecem as estruturas dos elementos série do sistema, lidas dos cartões DLIN e

DCSC. Ressalta-se que, se os compensadores série não forem considerados, observa-se que os resultados obtidos são inconsistentes, por conta da ausência de alguns ramos.

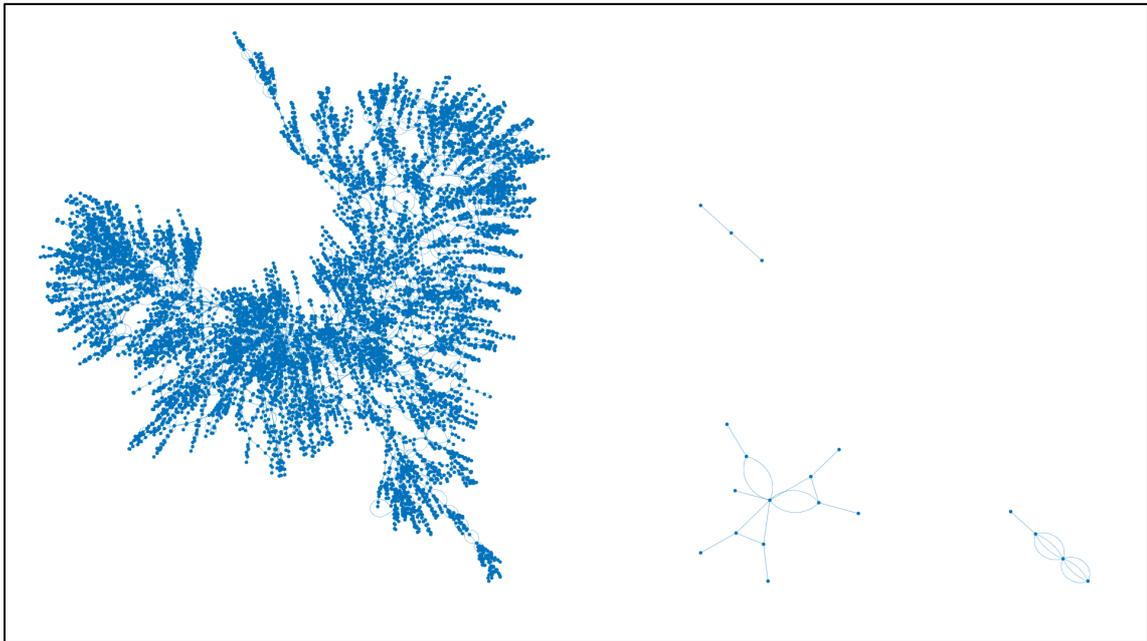
Então, fica evidente que, do ponto de vista do grafo da rede elétrica, tanto as linhas e transformadores como os compensadores significam a mesma coisa: ligações entre os nós do circuito. Entretanto, para modelagem matricial completa da rede, discutida na Seção 2.3, é importante que fique clara a necessidade de adicionar aos modelos lá desenvolvidos a representação de um compensador série, a ser incorporada, de alguma maneira, como admitância, tal como foram as linhas e os transformadores.

Como o objetivo deste trabalho não é a elaboração de um método para montagem da matriz admitância da rede ou mesmo a recriação completa do método de redução implementado no ANAREDE, optou-se por não apresentar a modelagem com mais esse elemento série, mostrando-se apenas a ideia básica.

Voltando à implementação para montagem do grafo, necessita-se, então, que sejam combinadas as informações das listas “de – para” dos cartões lidos para que se obtenha uma lista única e completa. Antes disso, entretanto, é necessário remover das listas de dados originais linhas e barras que estejam marcadas como desligadas, a fim de que resultado represente de forma mais fiel possível o caso em análise, evitando por exemplo que no conjunto das barras escolhidas para o equivalente haja alguma desligada. Uma vez dada atenção a esse detalhe, basta converter as listas numéricas em listas de nomes utilizando as informações do cartão DBAR. Esse passo é importante, uma vez que, embora o grafo possa ter marcadores de nós como sendo números, nem todos os números correspondem a uma barra do sistema e, quando se utiliza a marcação por número, obrigatoriamente todos os números, mesmo quando não listados nas sequências “de – para”, terão um nó correspondente. Dessa forma, vários nós isolados serão adicionados ao grafo e desenhados, o que dificulta a interpretação e visualização.

Os pormenores da implementação descrita são apresentados no Apêndice A, em que se descreve uma função que, além de processar os dados e montar o grafo, também pode plotar o resultado mostrado na Figura 32. Todos os resultados mostrados nas subseqüentes descrições da implementação foram obtidos a partir do já citado caso do PAR/PEL 2022-2026 Verão 2022/2023 Leve.

Figura 32 – Grafo completo da rede elétrica



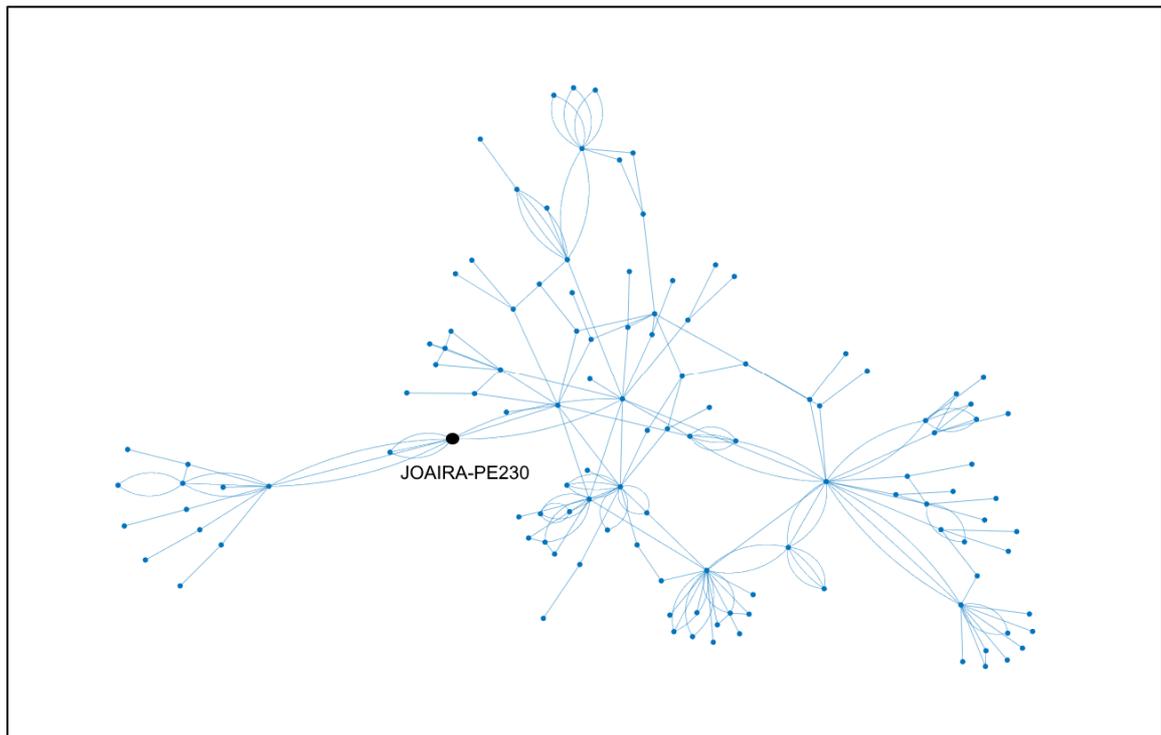
Fonte: O autor (2022)

Imediatamente, nota-se que a rede elétrica em seu estado original é composta por 4 ilhas, uma principal e três menores. À primeira vista esse resultado pode parecer estranho, mas é confirmado analisando o arquivo no próprio ANAREDE, ao desenhar as barras das ilhas menores e verificar que não têm ligação com outras barras da ilha principal. Além disso, ao verificar o gerenciador de arquivos observa-se que, realmente, o sistema possui quatro barras de referência, uma para cada ilha, e deve ser assim para que seja possível realizar as simulações de fluxo de potência. Conforme discutido na Seção 3.2, qualquer tentativa de eliminação completa dessas ilhas utilizando a ferramenta de equivalentes resultará em retenção completa dessas partes do sistema. Desse modo, fica mais evidente a necessidade de tratamento prévio desses casos do ONS, antes da aplicação da redução, para retirar as barras que não estejam na ilha de interesse, evitando, pois, que figurem no equivalente final, restringindo ainda mais a quantidade de barras de interesse. O contorno desse problema é abordado na seção seguinte.

De posse do grafo da rede elétrica, pode-se obter um conjunto conexo com um determinado número de barras, centrado em uma dada barra. Para isso, basta utilizar a função “*bfsearch*” do MATLAB, que realiza uma busca em largura, tal como descrito na Seção 2.5, e retorna uma lista de nomes na ordem em que são encontrados pelo algoritmo (MATHWORKS, 2022b). Naturalmente, essa lista conterá apenas os nomes

das barras da ilha à qual pertence a barra central. A partir daí, basta escolher um conjunto com a quantidade desejada. No caso deste trabalho, um máximo de 120 barras. Como exemplo, foi plotado o grafo obtido a partir da barra de 230 kV de Joairam e com 120 barras no total, mostrado na Figura 33. Esse exemplo mostra que

Figura 33 – grafo do conjunto conexo de 120 barras centrado em JOAIRA-PE230



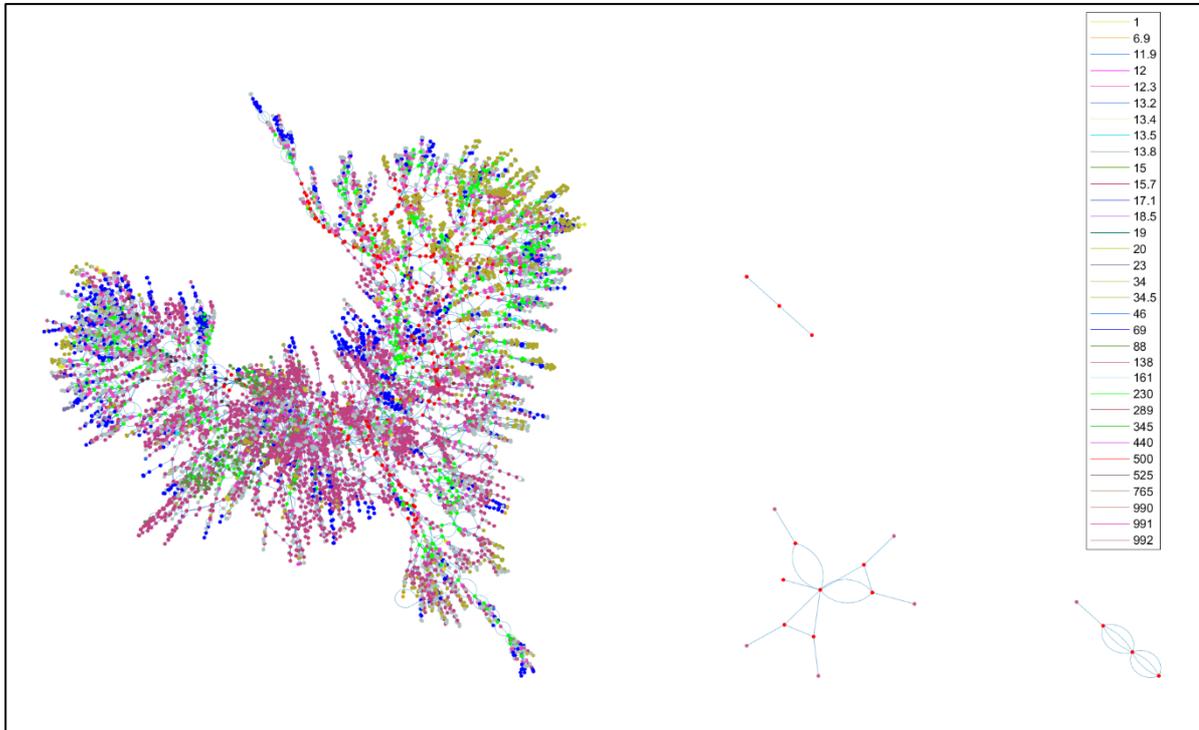
Fonte: O autor (2022)

a barra selecionada para o início da busca não necessariamente fica centralizada no grafo, pois pode estar próxima a uma extremidade da rede básica, como a que foi escolhida.

De posse da região conexa que ficará retida após a operação de redução, é necessário tratar o caso de estudo, retirando os elos CC e removendo barras não relacionadas à região de interesse e implementar a redução utilizando a própria ferramenta do ANAREDE. Esses passos serão detalhados nas seções seguintes. Antes, porém, é interessante apresentar um resultado secundário, relacionado às figuras dos grafos produzidas. Para enriquecer a visualização e adicionar informações relevantes, é possível colorir os grafos da Figura 32 e da Figura 33 de acordo com o nível de tensão de cada barra. O algoritmo desenvolvido para essa finalidade é apresentado em detalhes no Apêndice B e consiste basicamente em

tratamento de dados para associar a cada tensão de base uma lista de nomes de barras com essa tensão, e aplicar para cada lista o comando de colorir.

Figura 34 – Grafo da rede elétrica colorido



Fonte: O autor (2022)

As cores dos níveis de tensões principais são pré-definidas, sendo 500kV vermelho, 230kV, verde e 69kV, azul e as demais são escolhidas aleatoriamente após checagem para verificar se não são iguais às pré-definidas. Os resultados são apresentados na Figura 34 e na Figura 35. Pode não ser conveniente estabelecer cores aleatoriamente, pois inevitavelmente haverá semelhanças. Inclusive, pode ser mais útil colorir somente os níveis de tensão desejados, evitando informações excessivas nas figuras. Isso pode ser feito com simples adaptações na função apresentada.

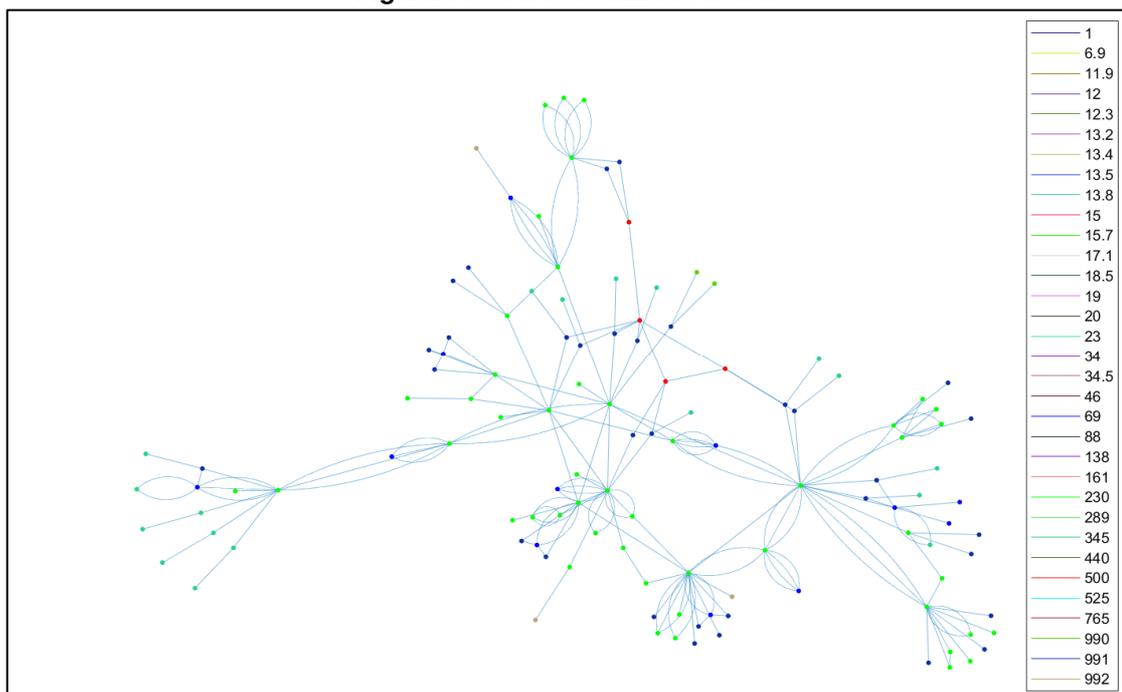
Aproveita-se para introduzir uma outra função utilizada para execução da função de colorir e para outras funções descritas nas seções seguintes: a função “*busname2num*”, apresentada no Apêndice F. Essa função se destina à obtenção de uma sequência de números de barras a partir de uma sequência dos nomes correspondentes. Outra peculiaridade desses casos do ONS é que algumas barras têm nomes repetidos, sendo assim, a função apresenta duas opções: na primeira, são retornados todos os números correspondentes à lista fornecida, incluindo

números correspondentes a barras de mesmo nome e, na segunda, é retornada uma lista somente com o primeiro dos números encontrado para um determinado nome, de acordo com a ordenação do próprio cartão DBAR. Em ambas as opções deve-se entrar com uma lista sem nomes repetidos. É interessante pontuar esse detalhe porque, quando da construção dos grafos mostrados, foram utilizados os nomes como marcadores, de modo que o programa não conseguirá diferenciar barras com nomes repetidos e as representará como uma só nos desenhos dos grafos.

É por isso que ao contar com o MATLAB o número de nós do grafo completo e comparar com o número de barras lidas no cartão DBAR, que pode ser visto pelo tamanho de qualquer das variáveis da estrutura “bus”, o resultado é um pouco inferior, mesmo quando descontadas a quantidade de barras desabilitadas do sistema, as quais já não são incluídas no grafo.

Sendo assim, os objetos de grafos gerados e qualquer lista proveniente deles, inclusive as listas resultado de buscas em largura, são entradas adequadas para a função “busname2num”. Essa função, quando utilizada com a primeira opção, evita erros na execução de funções que requerem que todos os números sejam listados, sendo mais adequada para os propósitos das funções descritas nas seções seguintes e, com a segunda opção, fica mais adequada à função de colorir.

Figura 35 – Rede reduzida colorida



Fonte: O autor (2022)

4.2 TRATAMENTO PRÉ-EQUIVALENTE

Conforme já evidenciado várias vezes, antes de qualquer tentativa de redução da rede para o conjunto encontrado na seção anterior, faz-se necessário tratar os casos de estudo para garantir controle sobre a quantidade final de barras. O primeiro passo é a eliminação dos elos CC, que pode ser feita a partir de um comando próprio do ANAREDE, executado com o cartão DCRE. Esse cartão é elaborado a partir da informação do número do elo e de um comando de eliminação, que pode ser B, para eliminar o bipolo, P para eliminar o polo positivo e N para eliminar o polo negativo (CEPEL, 2021, p.2-48). Quando da implementação, observou-se que, para eliminar um elo que tivesse somente um dos polos, por exemplo somente o positivo, como todos os presentes no caso em estudo, não se pode usar o código B, que é o padrão caso a coluna dessa informação seja deixada em branco. Sendo assim, a função apresentada no apêndice C também identifica os polos presentes em um determinado elo CC a partir das informações do cartão DCBA (CEPEL, 2021, p.2-34). A estrutura lida a partir desse cartão, “*cbus*”, armazena informações dos números das barras CC, suas polaridades e os elos ao qual pertencem. É interessante salientar que um elo CC contempla três tipos de elementos: barras CC, linhas CC e conversores CC-CA. As informações necessárias à representação desses elementos são carregadas por meio dos comandos de execução DELO, DCBA, DCLI, DCNV, DCCV, nesta ordem (CEPEL, 2021, p.1-7).

Para a finalidade da função desenvolvida, não são necessárias informações de linhas ou de conversores, pois basta que se saiba a polaridade de cada barra. Agrupando as barras por elo, o programa avalia se um elo possui barras positivas e negativas, somente positivas ou somente negativas, associando a letra correspondente, B, P ou N, respectivamente, de acordo com o caso. Dessa forma, o cartão DCRE pode ser montado corretamente e de maneira generalizada e automática, utilizando a formatação e espaçamento adequados, conforme detalhado no apêndice C. Para o exemplo utilizado, o cartão montado como resultado é apresentado na Figura 36. Note-se que a opção PCTE é utilizada ao lado do comando de execução, para que as informações dos elos sejam retiradas e, nas barras CA que antes recebiam potências oriundas de elos CC, sejam adicionadas injeções equivalentes que representem, pelo menos de maneira simplificada, o comportamento dessa parte contínua do sistema.

Figura 36 – Cartão DCRE gerado pelo MATLAB

01	DCRE	PCTE
02	1	P
03	2	P
04	3	P
05	4	P
06	1001	P
07	1002	P
08	1003	P
09	1004	P
10	2001	P
11	2002	P
12	3001	P
13	3002	P
14	3003	P
15	3004	P
16	99999	
17	FIM	

Fonte: O autor (2022)

Após carregamento do arquivo no caso correspondente convergido, os elos CC são removidos com sucesso e substituídos por injeções. O próximo passo, então, é a remoção das ilhas e das barras desligadas, o que é feito elaborando um cartão DBAR com a opção E, de eliminação de dados (CEPEL, 2021, p.2-21). Mais uma vez, esse processo é realizado com o auxílio de uma função, apresentada no Apêndice D. e cujas entradas são a estrutura “bus” e uma lista de nomes que corresponda à ilha de interesse sem contar com barras desligadas, ou seja, justamente a saída completa da função “*bfsearch*”. A partir dessas informações, o programa cria uma lista de barras que não estejam na lista fornecida, ou seja, que pertencem a outras ilhas que não a principal ou que estejam desligadas.

A função “*busname2num*” mais uma vez é utilizada e, nesse caso, é necessário que se utilize a opção que retorna uma lista com os números de todas as barras, mesmo das com nomes idênticos, pois, do contrário, somente uma das barras com nome repetido será mantida, sendo as demais eliminadas, o que ocasionaria erros de execução e formação de ilhamentos adicionais. Isso ocorre porque a comparação da lista fornecida com a lista de barras completa da estrutura “bus” é feita com base nos números das barras e não nos nomes, a fim de facilitar a comparação e aproveitar a indexação lógica. Desse modo, alguns nomes da lista fornecida devem corresponder a mais de um número de barra nos casos com repetições ou então esses números a mais serão entendidos como barras a serem removidas.

O cartão gerado é mostrado na Figura 37, contemplando, ao todo, 39 barras a

Figura 37 – Cartão para aparar os excessos

01	DBAR	21	7056E
02	47E	22	7059E
03	85E	23	7060E
04	970E	24	7061E
05	971E	25	7062E
06	1040E	26	7063E
07	1100E	27	7064E
08	1101E	28	7065E
09	1103E	29	7575E
10	3159E	30	7576E
11	3563E	31	7577E
12	3565E	32	7578E
13	4612E	33	8561E
14	4617E	34	8592E
15	4912E	35	8593E
16	7001E	36	8594E
17	7050E	37	8595E
18	7051E	38	8596E
19	7053E	39	23582E
20	7055E	40	23585E
		41	99999
		42	FIM

Fonte: O autor (2022)

serem removidas. Esse número é exatamente a soma das 19 barras correspondentes às três ilhas menores e das 20 barras que se encontram desligadas no caso em análise. Após carregar esse arquivo o programa alerta para perda de dados e sugere aplicação da ferramenta de equivalentes, mas como se sabe, ela não remove ilhas inteiras. Além disso, para o objetivo deste trabalho, a remoção das ilhas menores não trará nenhum prejuízo. Caso esse passo não fosse realizado, pelo menos 19 barras extras permaneceriam no sistema equivalente, de modo que seria necessário diminuir a quantidade que realmente interessa para conseguir carregar o caso reduzido na versão estudante.

Uma vez tratado o caso de estudo para contorno desses entraves, pode-se prosseguir realmente à aplicação da ferramenta de equivalentes para redução do sistema.

4.3 SUBDIVISÃO DA REDE PARA REDUÇÃO EM ETAPAS

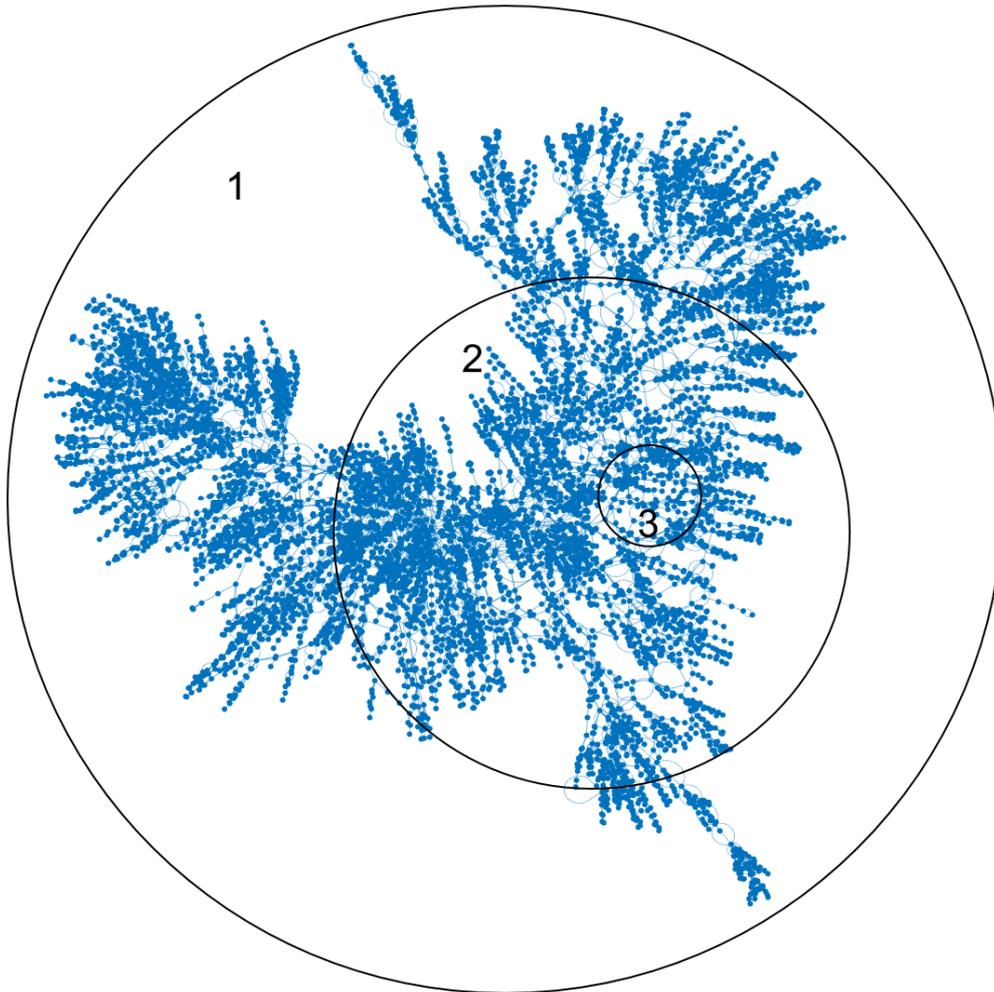
Conforme observado no Capítulo 3, é bastante oneroso selecionar uma região tão detalhada como a obtida na Seção 4.1 somente utilizando os grupos de área, nível de tensão e barra. Praticamente, seria necessário selecionar barra a barra para obter

a região mostrada, o que não é conveniente utilizando a interface do programa. Seria mais rápido, entretanto, elaborar um cartão EXEQ com a lista de barras desejadas para retenção. Porém, conforme discutido na Seção 3.3, a ferramenta não é capaz de reduzir o sistema completo, com cerca de 10500 barras, para um sistema tão diminuto, com apenas 120, de uma só vez. Dessa forma, faz-se necessária uma adaptação, realizando o processo de redução em dois passos.

O primeiro passo reduziria a rede completa para uma intermediária, por exemplo, de 6000 barras e o segundo, dessa rede menor para a final. Essa divisão, entretanto, não pode ser feita descuidadamente, apenas selecionando um determinado número de barras sem observar a conexão entre elas. É necessário que se produza uma outra sequência conexa, tal como se produziu a de 120 barras, mas agora com o número intermediário, a fim de evitar outros erros de execução por parte do programa.

Ainda assim, seria inconveniente produzir dois arquivos do comando EXEQ, um para cada passo, principalmente por conta do elevado número de linhas em cada um, o que, provavelmente teria acarretado mais dificuldades de execução. Por isso, optou-se por utilizar as estruturas de agregadores, implementadas com o cartão DAGR. Esse cartão de dados permite a definição de conjuntos genéricos de barras e seus respectivos identificadores, bem como os identificadores das ocorrências de cada grupo agregador. Pode haver no máximo 10 grupos de agregadores cada qual com, no máximo, 999 ocorrências, de acordo com o número de colunas para inserção da numeração dessas ocorrências (CEPEL, 2021, p.2-12).

Pode-se interpretar essas definições de agregador e ocorrência dadas no manual, como grupo e subgrupo. Conforme exemplo do próprio manual, pode-se definir um grupo denominado estados da federação e definir ocorrências ou subgrupos com os nomes de cada estado. Da mesma forma, pode-se definir, para os propósitos desse trabalho, um agregador cujas ocorrências se refiram a três conjuntos de barras: a região mais externa, a ser eliminada no primeiro passo descrito; a parte da região intermediária que exclui a região interna, a qual será removida no segundo passo; e a região interna, que será retida. A Figura 38 ilustra o que se quer definir. Uma vez delimitadas essas regiões, basta que se adicione ao cartão DBAR, em cada linha, a ocorrência adequada na coluna correspondente ao identificador de agregador definido. Por exemplo, se não havia agregadores previamente definidos no arquivo original, as identificações serão adicionadas na coluna referente ao agregador 1.

Figura 38 – Divisão da rede em regiões para redução

Fonte: O autor (2022)

A função apresentada no Apêndice E realiza o processo de divisão da rede, elaboração do cartão de agregadores e adição da informação de identificação e ocorrências no DBAR. Do ponto de vista de implementação, para definir as regiões mostradas na Figura 38, basta ter como entrada a sequência de nomes da ilha principal, retornada pela função do Apêndice D, a lista intermediária e a lista reduzida. A região 1 é, então, definida como a sequência maior exceto os elementos da intermediária e a 2 é formada pelos elementos da intermediária exceto os que sejam da reduzida, que é a própria região 3.

Para montagem do cartão de agregadores, é necessário verificar se já há algum definido para fazer a definição com a numeração seguinte. Se já houver 10 grupos de agregadores pré-definidos, algum deles deve ser apagado manualmente para implementar essa solução. Ao término da execução, o programa fornece um cartão

com 2 comandos, conforme mostra a Figura 39. Nela, somente uma parte do cartão DBAR é mostrada, já que ele terá o mesmo tamanho que o cartão DBAR original, para que se possa atribuir cada barra à ocorrência correta. Na porção mostrada, todas as barras pertencem à região 1, ou seja, a mais externa. Note-se que a operação utilizada no DBAR é “M”, para modificação de dados de barra (CEPEL, 2021, p.2-21).

Figura 39 – Cartão para montar grupos de agregadores

00001	▣	DAGR	
00002	▣	001 DIV PARA EQUIVALENTE	
00003		001 A REDE EXTERNA PARTE 1	
00004		002 A REDE EXTERNA PARTE 2	
00005		003 A REDE INTERNA	
00006		FAGR	
00007		99999	
00008	▣	DBAR	
00009		9636M	001
00010		4126M	001
00011		7526M	001
00012		7528M	001
00013		7531M	001
00014		7532M	001
00015		41834M	001
00016		41836M	001
00017		465M	001
00018		466M	001
00019		472M	001
00020		473M	001
00021		41688M	001
00022		41690M	001
00023		474M	001
00024		3471M	001
00025		13073M	001
00026		3063M	001

Fonte: O autor (2022)

Uma vez carregado esse arquivo, o programa definirá os agregadores, de forma que esses agrupamentos aparecerão na interface da ferramenta de equivalentes. Basta, portanto, que se execute o fluxo de potência e as reduções da região 1 e, em seguida, da região 2, uma de cada vez. O resultado será uma rede reduzida conforme definida na Seção 4.1. Na próxima seção, organiza-se o passo-a-passo desenvolvido até aqui.

4.4 PASSO-A-PASSO E CRIAÇÃO DA FUNÇÃO PRINCIPAL

A fim de concatenar os procedimentos e simplificar a execução do processo, convém criar uma função que, chamando as demais funções, realize a seleção das barras retidas da rede equivalente, a eliminação dos elos CC, a remoção das barras indesejadas e a elaboração dos agregadores. Esse passo final também permite a generalização do processo, colocando como parâmetros o tamanho da região

reduzida e o nome da barra a partir da qual a busca será iniciada, que também pode ser denominada por barra “raiz”. O código dessa função principal é apresentado na Figura 40. Para acelerar o tempo de execução do código e produzir somente as informações necessárias à execução da ferramenta de equivalentes, a elaboração gráfica dos grafos é suprimida, visto ser uma parte computacionalmente dispendiosa.

Figura 40 – Função Egrede

```

1  function Egrede(filename,path,rootbus,neq,naux)
2  % This function calls all the necessary functions for generation of .pwf
3  % files required for adapted use of the EXEQ command from ANAREDE to obtain
4  % a small connected equivalent network.
5  %
6  % Parameters:
7  % -filename: name of the file of the base case with .pwf extension;
8  % - path: path to the file;
9  % - rootbus: the bus with which to start the search. The center of the
10 % equivalent region;
11 % - neq: The number of buses on the final reduced network;
12 % - naux: The number of buses on the auxiliary network (default 6000).
13
14 [bus,line,csc,power,shunt,shutl,elo,cbus,cnv,tbg,agr]=readPWfplus(filename,path);
15 G = ElNetworkGraph(bus,line,csc,1,0);
16 %[adjstru]=AdjacencyStructure(bus,line,csc);
17 searchseq=bfsearch(G,rootbus);
18 equivseq=searchseq(1:neq,1);
19 %retirada dos elos cc
20 ElimElo(elo,cbus);
21
22 %trim electrical network, deleting disjoint graph buses and disabled buses
23 trimmedNetNums=trimElnet(bus,searchseq);
24
25 %making AGR card and adding to buses
26 seq_aux=searchseq(1:naux,1);
27 makeAgr(agr,bus,trimmedNetNums,equivseq,seq_aux);
28
29 end

```

Fonte: O autor (2022)

Ao executar essa função, serão criados três arquivos na pasta ativa: o primeiro para eliminar os elos CC, denominado “ElimElo”; o segundo para remover barras indesejadas, denominado “TrimElNet”; e o terceiro para elaborar os agregadores e aplicar os indicadores às barras adequadamente, denominado “AGRforNet”. Após isso, deve-se abrir no ANAREDE o caso base em estudo e carregar os arquivos gerados na ordem correta para, em seguida, executar o fluxo de potência e a ferramenta de equivalentes, eliminando no primeiro passo a região 1 e, no segundo, a região 2. Enumerando, tem-se o passo a passo:

1. Carregar o caso em estudo a partir do arquivo histórico (.sav) correspondente;

2. Adicionar ao caso de estudo o .pwf "ElimElo", que eliminará os elos CC, substituindo-os por injeções equivalentes;
3. Adicionar ao resultado do passo 2 o .pwf "TrimElNet", que cortará da rede as barras das ilhas menores e as barras desabilitadas;
4. Adicionar ao resultado do passo 3 o .pwf "AGRforNet", que criará os agregadores e aplicará os respectivos indicadores;
5. Executar o fluxo de potência; e
6. Realizar a redução da rede, escolhendo no tipo o agregador "DIV para equivalente". Eliminar primeiro a parte 1 e depois a parte 2 (a 3 é o próprio conjunto de 120 barras). Lembrar de utilizar a opção FINT.

Com isso, fica estabelecida a metodologia desenvolvida, a qual, a priori, pode ser utilizada para um caso base qualquer. Apesar de o problema proposto já estar resolvido, na próxima seção é apresentada uma alternativa ao uso da função *bfsearch* para realizar a seleção das barras.

4.5 ALTERNATIVA DE IMPLEMENTAÇÃO: BUSCA POR NÍVEL

Para designação de regiões de uma rede elétrica, é muito comum organizar as barras de acordo com a proximidade ou vizinhança de uma determinada barra, à semelhança do que se costuma fazer na teoria de grafos, conforme apresentado na Seção 2.5. A função pré-implementada no MATLAB para busca em largura não retorna, entretanto, em que vizinhança da barra raiz se encontra uma determinada barra da sequência obtida, de modo que o único parâmetro de escolha se torna a quantidade de barras. Sendo assim, é interessante, até como forma de exercício para aplicação da teoria apresentada, o desenvolvimento de mais duas funções: uma que, a partir das informações da rede, retorne a estrutura de adjacência e outra que, a partir dessa estrutura realize uma busca em largura guardando não só a informação da sequência de barras encontrada, mas também a que vizinhança pertence cada barra.

A função para elaboração da estrutura de adjacência é detalhada no Apêndice G e o início de sua implementação, quanto ao processamento dos dados dos cartões, é bastante semelhante ao da função utilizada inicialmente, com a diferença de que os pares “de – para” repetidos não são representados. Do contrário, haveria nas listas de adjacência nomes de nós repetidos, um para cada ligação entre os nós em questão. Após esse tratamento, basta utilizar as indexações corretas para organizar

os dados tal como apresentado na Seção 2.5. Para cada par “de – para”, adiciona-se o número da barra “de” na lista da barra “para” e vice-versa. Utilizam-se números ao invés de nomes para evitar problemas com nomes repetidos, tal como descrito no final da Seção 4.1.

É importante perceber que na implementação da função *busname2numb*, que corrige esse problema quando necessário, considera-se que as barras com nomes repetidos estão ligadas a uma mesma barra, aparecendo em sequência na lista de busca. Geralmente isso é o que ocorre ou pelo menos foi o que se observou com os pares repetidos verificados, mas não necessariamente é verdade sempre, o que poderia, em situações extremas, provocar erros. Sendo assim, é mais seguro, desse ponto de vista, trabalhar com números do que com nomes de barras, sendo essa mais uma vantagem da alternativa apresentada. Também se pode utilizar números ao invés de nomes na implementação inicial, bastando que se modifique a maneira como se define o objeto grafo. Porém, isso não é conveniente caso se queira plotar as figuras, conforme já comentado. De qualquer maneira, para prosseguir utilizando números, o restante da implementação metodológica teria de ser adaptado e ficaria até mais simples, evitando a função de obtenção dos números a partir dos nomes.

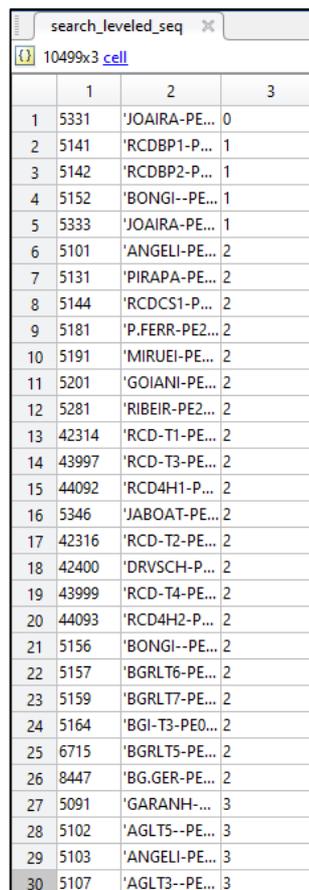
A partir da estrutura de adjacência desenvolvida, implementa-se a função que realizará a busca por nível, apresentada no Apêndice H. Aproveita-se para adicionar a possibilidade de escolher o tamanho da região final do equivalente também por um nível máximo. Por exemplo, o usuário pode requerer uma região equivalente até a 5ª vizinhança da barra inicial e com, no máximo, 80 barras. O programa obterá a lista de barras até a vizinhança estabelecida e, se a quantidade de barras for menor que a especificada, a lista equivalente com todos os níveis completos é retornada. Caso contrário, uma lista com o número máximo é retornada, nesse caso com o último nível incompleto.

A ideia da implementação é bastante semelhante ao que se descreveu na Seção 2.5, com apenas algumas mudanças. Inicialmente, realiza-se o primeiro passo do algoritmo, identificando a primeira vizinhança da barra raiz escolhida e a atribuindo a uma variável que indica o nível atual, a ser utilizado para a elaboração da fila de nós cujas vizinhanças serão vasculhadas. Nesse primeiro estágio a sequência de barras descobertas é o próprio nível 1. Define-se também a sequência de números dos níveis, que começa em zero, na barra raiz, e apresenta valor 1 quantas vezes forem as barras desse nível. Para o passo iterativo cria-se uma fila auxiliar que contém os

números de todas as barras vizinhas às barras do nível atual e, após isso, verifica-se quais dessas barras são desconhecidas com relação à sequência descoberta até então. Sendo assim, define-se o próximo nível, que é concatenado à sequência de barras descobertas pela busca. Também é concatenado ao vetor com os números dos níveis um vetor com todas as entradas iguais ao número do nível e de mesmo tamanho que o número de barras desse nível. Dessa forma, os vetores da sequência de barras e do nível vão crescendo de maneira correspondente. Quando não há na fila auxiliar nenhuma barra desconhecida, nada é executado no passo iterativo e a condição de continuidade do laço é interrompida.

A partir daí, basta avaliar as condições de nível e número de barras estabelecidas pelo usuário e organizar os dados na forma de células. A saída apresenta uma sequência bastante completa, com o número da barra na primeira coluna, o nome na segunda e o nível de vizinhança na terceira, conforme a Figura 41.

Figura 41 – Parte da saída da função busca por nível para o exemplo de Joairam



	1	2	3
1	5331	'JOAIRA-PE...	0
2	5141	'RCDBP1-P...	1
3	5142	'RCDBP2-P...	1
4	5152	'BONGI--PE...	1
5	5333	'JOAIRA-PE...	1
6	5101	'ANGELI-PE...	2
7	5131	'PIRAPA-PE...	2
8	5144	'RDCS1-P...	2
9	5181	'P.FERR-PE2...	2
10	5191	'MIRUEI-PE...	2
11	5201	'GOIANI-PE...	2
12	5281	'RIBEIR-PE2...	2
13	42314	'RCD-T1-PE...	2
14	43997	'RCD-T3-PE...	2
15	44092	'RCD4H1-P...	2
16	5346	'JABOAT-PE...	2
17	42316	'RCD-T2-PE...	2
18	42400	'DRVSCH-P...	2
19	43999	'RCD-T4-PE...	2
20	44093	'RCD4H2-P...	2
21	5156	'BONGI--PE...	2
22	5157	'BGRLT6-PE...	2
23	5159	'BGRLT7-PE...	2
24	5164	'BGI-T3-PE0...	2
25	6715	'BGRLT5-PE...	2
26	8447	'BG.GER-PE...	2
27	5091	'GARANH-...	3
28	5102	'AGLT5--PE...	3
29	5103	'ANGELI-PE...	3
30	5107	'AGLT3--PE...	3

Fonte: O autor (2022)

5 VERIFICAÇÃO BÁSICA DA METODOLOGIA IMPLEMENTADA

Uma vez resolvido o problema proposto, com a aplicação exitosa da metodologia implementada para a obtenção de um equivalente de rede conexo com a ferramenta de equivalentes do ANAREDE, é importante verificar o desempenho da rede equivalente obtida. Não é o intuito deste trabalho realizar investigações sobre as limitações do equivalente obtido e em que condições é adequado utilizá-lo, mas, no mínimo é necessário verificar a concordância das simulações de fluxo de potência utilizando o caso base e o caso reduzido. Para realizar simulações com o caso reduzido, é necessário designar outra barra de referência caso a região escolhida já não contenha uma das referências do sistema original.

Para o caso exemplo desenvolvido nas seções anteriores, escolheu-se como barra de referência a barra de 230 kV de Garanhuns II. No Apêndice I, são apresentados os resultados das simulações realizadas com base em uma mesma porção da rede tanto para a rede completa quanto para rede reduzida. Os resultados de fluxo mostrados na Figura 42 e na Figura 43 são referentes a uma situação com a rede íntegra e são idênticos nesses dois casos, conforme esperado. É importante também comparar os resultados em situações de contingências simples, avaliando a capacidade do equivalente de simular a resposta da rede externa a impactos na rede interna. Foram escolhidas duas contingências simples:

1. Uma das linhas em 230kV conectando Bongi e Joairam; e
2. Um dos transformadores 230/69 kV, 100 MVA, da subestação Bongi.

Os resultados para a primeira contingência são apresentados na Figura 44 e na Figura 45, e para a segunda, na Figura 46 e na Figura 47. Nota-se uma identidade quase que total comparando os resultados para as duas redes. Apenas na contingência 1 há leves variações no ângulo da barra de 69 kV de Bongi e no fluxo em uma das linhas em 230 kV entre a barra de Garanhuns II e Angelim, ambas diferenças de apenas um décimo. Esses resultados são apenas um primeiro indicativo de que o desempenho da rede equivalente deve ser satisfatório, de modo que ainda é muito importante investigar mais a respeito para realmente validar a acurácia das simulações de fluxo de potência realizadas com redes equivalentes.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos estabelecidos, foi possível desenvolver uma metodologia generalizada para obtenção de equivalentes de qualquer tamanho, adaptando o uso da ferramenta de equivalentes do ANAREDE a um método de seleção de barras via teoria de grafos. Essa nova abordagem diminui a influência do usuário, facilitando a entrada, e simplifica significativamente o processo de seleção, além de automatizar os passos intermediários de eliminação dos elos CC, remoção de barras indesejadas e definição dos agregadores, os quais se prestam às adaptações necessárias. Conforme demonstrado, a partir desse método é possível obter com êxito redes equivalentes pequenas, com no máximo 120 barras, viabilizando o carregamento na versão estudante do ANAREDE.

Essa possibilidade abre caminho para que se realizem, ainda no âmbito da graduação, estudos utilizando regiões de interesse do próprio SIN, o que é, sem dúvida, de grande benefício para os alunos e bastante enriquecedor para o desenvolvimento de trabalhos de conclusão de curso.

Todavia, é importante também reconhecer que este é apenas o início do que poderá se tornar um tema mais amplo, uma vez que as metodologias e implementações apresentadas certamente podem ser aperfeiçoadas e utilizadas ou adaptadas para outras aplicações. Por exemplo, não foi realizada uma testagem abrangente da metodologia utilizando vários casos, o que pode revelar pontos a serem melhorados na implementação. Além disso, não foi avaliado em detalhes o desempenho da rede equivalente obtida, no que diz respeito aos resultados de fluxo de potência em um maior número de situações de contingência e a partir de variações de carga, tendo sido realizada apenas uma verificação da concordância dos resultados para a rede íntegra e dois casos de contingências simples.

Pelo fato de se ter utilizado o método dos equivalentes de Ward estendido, já implementado na ferramenta do ANAREDE, já era esperado, de acordo com a teoria apresentada, que, pelo menos no caso base, os resultados fossem idênticos aos obtidos com a rede completa. Sendo assim, uma investigação comparativa entre o comportamento da rede equivalente e o da rede completa em situações de impactos na rede interna é de grande importância para consolidar a validação dos resultados

obtidos neste trabalho.

Outra ressalva que se pode fazer ao que se desenvolveu é a de que o paradigma atual para realização de estudos de fluxo de potência é a simulação com a rede completa do SIN, de modo que a viabilização da ferramenta de equivalentes de rede, à primeira vista, não traria contribuições para essa prática no setor elétrico, especialmente porque não há dificuldades computacionais à simulação com a rede completa. Entretanto, uma vez que a solução está proposta, é aberta a possibilidade de discussão dos benefícios de se utilizar redes equivalentes ao invés de simular com todo o SIN. É interessante observar, portanto, que a imposição de uma restrição, de uma dificuldade, como é a restrição da versão estudante do programa, é a força motriz para o desenvolvimento de soluções e contornos.

Da mesma forma que no passado, na época dos analisadores de rede, o desenvolvimento de metodologias de equivalentes de circuitos era uma necessidade, pelas limitações no número dos componentes físicos das redes em escala, o desenvolvimento das adaptações metodológicas aqui apresentadas tornou-se uma necessidade frente às limitações impostas. Sendo assim, não podem existir soluções sem que existam problemas. Entretanto, uma vez existindo, as soluções poderão transcender suas finalidades originais, e passar a ter sentido próprio quando são encontradas para elas outras aplicações. É nesse intuito, o de tornar a metodologia aqui desenvolvida uma ideia com importância própria, que são sugeridos a seguir os próximos passos para continuidade deste trabalho.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com o exposto, há duas vertentes à continuidade deste trabalho: a primeira e mais imediata é a da investigação comparativa para validar os resultados obtidos e o subsequente uso da metodologia produzida para realização de estudos utilizando redes reduzidas; e a segunda é relacionada à busca de outras aplicações para o que se desenvolveu. Por exemplo, para transitórios eletromagnéticos, uma área que ainda prescinde do uso de equivalentes, pode ser que o método apresentado facilite ou crie alternativas ao que se pratica atualmente.

Enumerando, são feitas as seguintes sugestões para aplicação direta deste trabalho:

- Investigação comparativa entre o desempenho da rede equivalente e o da rede completa nas simulações de fluxo de potência em situações de impactos na rede interna;
- Avaliação das limitações de uso da rede equivalente e estabelecimento de práticas necessárias à obtenção de resultados acurados inclusive buscando definir melhor quais os critérios para a seleção adequada da barra de referência da rede equivalente; e
- Aplicação da metodologia para realização de estudos com redes reduzidas, dentro das possíveis limitações do equivalente.

Com relação a aplicações indiretas deste trabalho, são muitas as possibilidades, dado o que se mostrou ser possível realizar, mas algumas ideias são enumeradas a seguir:

- Utilização da metodologia, para obtenção de circuitos equivalentes destinados a simulações de transitórios eletromagnéticos;
- Aperfeiçoamento das funções de seleção para incorporação de pesos aos ramos do grafo a fim de representar, por exemplo, separação elétrica entre barras, o que forneceria circuitos equivalentes mais condizentes caso este seja um parâmetro importante; e
- Adaptação da metodologia desenvolvida para outras ferramentas do CEPEL, como o ANAFAS.

Para a aplicação em transitórios, ressalta-se a importância da busca por nível desenvolvida na Seção 4.5, uma vez que se pode definir uma região utilizando o critério de vizinhanças, tal como se costuma fazer para equivalentes de transitórios. Claro, seria necessário averiguar como se pode adaptar o equivalente obtido pelo ANAREDE para o formato adequado à utilização em programas como o ATP.

REFERÊNCIAS

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de análise de redes V11.05.05** [Rio de Janeiro]: CEPEL, jul. 2021.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de análise de redes V11.05.05: Manual do usuário.** [Rio de Janeiro]: CEPEL, jul. 2021.

DESOER, Charles A; KUH, Ernest S. **Basic Circuit Theory** 1st edition. [Estados Unidos]: McGraw-Hill, Inc, 1969.

GUILLEMIN, Ernst A. **Introductory Circuit Theory.** Third Printing. New York: John Wiley & sons, Inc., 1953.

HUELSMAN, Lawrence P. **Circuits, matrices and linear vector spaces.** Dover edition. Mineola, New York: Dover publications, Inc., 2011.

HUGHES, Thomas P. **Networks of Power:** electrification in western Society, 1800-1930. Softshell books edition. Baltimore: Johns Hopkins University press, 1993.

KRON, Gabriel. **Tensor Analisis of Networks.** First Edition. New York: John Wiley & sons, Inc., 1939.

MATHWORKS. **MATLAB R2021a** [Estados Unidos]: Mathworks, jan 2021.

MATHWORKS. **Help center:** graph, 2022a. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/graph.html>> acesso em 10/02/2022.

MATHWORKS. **Help center:** graph and network algorithms, 2022b. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/graph-and-network-algorithms.html>> acesso em 10/02/2022.

MONTICELLI, Alcir J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica.** 1ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

NETWORK ANALYZER (AC power). **Wikipédia**, 2022. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_\(AC_power\)#cite_note-19](https://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_(AC_power)#cite_note-19)> acesso em 27/03/2022

SEDGEWICK, Robert. **Algorithms in C.** 1ª edição. Estados Unidos: Addison-Wesley, 1990.

SHEN, D.W.C. **Generalized Star and Mesh Transformations.** The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science: series 7, 38:279, p.267 – 275, [London], 1947.

STEVENSON, William D.; GRAINGER, John J. **Power System Analysis** International Edition. [Estados Unidos]: McGraw-Hill, Inc., 1994.

TYMPAS, A.; DALOUKA, D. **Metaphorical Uses of an Electric Power Network:** Early Computations of Atomic Particles and Nuclear Reactors. Metaphorik.DE. Volume 12, p.65-84,2007. Disponível em:

<https://www.metaphorik.de/sites/www.metaphorik.de/files/journal-pdf/12_2007_tympasdalouka.pdf>. Acesso em 27/03/2022

WARD, J. B. **Equivalent circuits for power flow studies**. AIEE Transactions. Volume 68, p. 373 – 382, New York, 1949.

APÊNDICE A – FUNÇÃO PARA OBTER O GRAFO DE UMA REDE

Neste e nos apêndices seguintes, que apresentam as funções desenvolvidas pelo autor utilizando o MATLAB, a implementação foi escrita na língua inglesa, uma vez que não é indicado, nem mesmo nos comentários, o uso dos acentos e símbolos característicos da língua portuguesa nesses programas. Por outro lado, também é inconveniente escrever fora do registro padrão de português para evitar tais símbolos e acentos.

```
function [G,Elnetfig,Gplot] = ElNetworkGraph(bus,line,csc,optname,optplot)
% Function to obtain the graph of an electrical network. Its implementation
% is very similar to the adjacency structure function, but it ends after
% obtaining the from to pairs, whose repetitions are now mantained.
%
% Parameters:
% - bus, line and csc are structures containing bus, line and series
% compensator information, respectively, as read by readPWFplus.
% - optame is a flag. If 0 the graph will be plotted with numbers as
% markers, if 1, with bus names.
% - optplot is a flag. If 1 the graph will be plotted, if 0 it won't. If
% using 0 on this flag remember not to ask for Elnetfig or Gplot!
% Only assign the function call to one variable. i.e. G=ElNetworkGraph(...)
%
% When plotting an electrical network graph it is preferable to use 1
% because there are numbers not associated to any buses, which will
% nonetheless be plotted as isolated pooints on the graph.
%
busnumbs=bus.numb;
busState=cellstr(bus.stat);
busnames=cellstr(bus.name);
busfl=line.busf;
bustl=line.bust;
lineState=cellstr(line.stat);
fswState=cellstr(line.fsst);
tswState=cellstr(line.tsst);
busfcs=csc.busf;
bustcs=csc.bust;
cscState=cellstr(csc.stat);

% First off, we need to check for disabled buses and lines and erase their
% entries, otherwise, we will draw an inaccurate graph. On this
% implementation, beyond excluding disabled lines and lines with one of the
% terminals open it was also necessary to make empty all the lines which
% had at one of its end a disabled bus. It seems that even excluding the
% disabled lines and partially openned lines there were still cases of
% lines incident on disabled buses that had to be removed.

disbuslogic=strcmp(busState,'D');
disbuses=busnumbs(disbuslogic);
L=length(busfl);
dislinelogic=false(L,1);
for i=1:L
    if any(disbuses==busfl(i)|disbuses==bustl(i))
        dislinelogic(i)=1;
    end
end
```

```

    end
end
dislinelogic=strcmp(lineState,'D')|strcmp(fswState,'D')|strcmp(tswState,'D'
)|dislinelogic;
discsclogic=strcmp(cscState,'D');

busnumbs(disbuslogic)=[];
busnames(disbuslogic)=[];
busfl(dislinelogic)=[];
bustl(dislinelogic)=[];
busfcs(discsclogic)=[];
bustcs(discsclogic)=[];

%The variable below refers to the number of enabled buses only, not the
%total number.
nbuses=length(busnumbs);

%concatenating the froms and tos to each array

busf=[busfl;busfcs];
bust=[bustl;bustcs];

nlines=length(bust);
%Now both arrays are concatenated into a single variable with multiplicity
%of circuits.

busft=[busf bust];

% If only a graph with node numbers is desired, we already have all the
% data needed. With a list of from to pairs, we have the edges of our
% graph, which is constructed and then plotted as below

if(~optname)
    G=graph(busft(:,1),busft(:,2));
    if optplot
        Elnetfig=figure('Name','Electrical Network Graph');
        Gplot=plot(G);
    end
else

% Else, to create a graph with bus names, it is necessary to relate the bus
% numbers and bus names, which is developed indirectly by means of the
% variable busindex
%
% As the name suggests, this variable carries the indexes of the bus
% numbers as on the array busnumbs. If there is a number which does not
% correspond to any bus, its index remain zero. Because of this
% possibility, the variable must have the lenght of the maximum bus number.
% Note that only the relevant(non zero) entries are used forward in the
% code.
% As an example, suppose that on the 500th position of busnumbs is the bus
% number 550. Then busindex(550)=500. Once more, the variable gives the
% index of a certain bus number on the array busnumbs.

busindex=zeros(max(busnumbs),1);
for i=1:nbuses
    busindex(busnumbs(i))=i;
end
%The names strings are to be stored in cells

```

```

fromnames=cell(nlines,1);
tonames=cell(nlines,1);
%Finally, two lists of names are created. The to names and from names. The
%key here is to understand that busnames and busnumbs have the same length
%and a number busnumbs(i) corresponds to the name busnames(i), i.e. the
%indexation of both arrays have bus information in the same order. Note
%that no reordering was necessary.
for i=1:nlines
    fromnames{i}=busnames{busindex(busft(i,1))};
    tonames{i}=busnames{busindex(busft(i,2))};
end

% With a list of from to pairs, we have the edges of our graph, which is
% constructed and then plotted as below. It is interesting to use different
% Layouts to plot our graph. The most adequate was force Layout.

G=graph(fromnames,tonames);

if optplot
    Elnetfig=figure('Name','Electrical Network Graph');
    Gplot=plot(G,'Layout','force');
end

end
end

```

APÊNDICE B – FUNÇÃO PARA COLORIR O GRAFO DE UMA REDE

```

function [] = colorElNetGraph(Gplot,fig,Gnodes,bus,tbg)
% This function aims to color the graph of a given electrical network. Its
% parameteres are:
% Gplot - the graph plot object of a certain graph. Make sure to call use
% ask for it when plotting a figure, as Gplot= plot(...);
% fig - is the figure name as established when opening a figure. Use
% figure('Name','choose a name') instead of numbers;
% Gnodes - is the cell (nnodesx1) containing the node names of the graph.
% It is assumed that the graph does not contain disabled buses or lines;
% bus - is the structure as read by readpwfplus, including disabled buses;
% tbg - is the structure as read by readpwfplus.
tbgID=tbg.ID;
tbgV=tbg.V;
listV=unique(tbgV);
numV=length(listV);
colorV=cell(numV,1);
% Predefined colors for 500 kV 230 kV and 138 kV tension levels.
predefcolors={[1 0 0],[0 1 0],[0 0 1]};
listnamesV=cell(1,numV);
% Note that listV colorV and listnamesV have the same indexation, with each
% element corresponding to a tension level. The function unique was used to
% define listV so as to remove repeated tensions for different IDs.
Gnodesnums=busname2num(bus,Gnodes,0);
LGnodes=length(Gnodesnums);

% Definition of the colors per tension level. The predefined colors are
% assigned and then the others are chosen randomly with the condition to
% be different than the predefined ones.
for i=1:numV
    switch listV(i)
        case 500
            colorV{i}=predefcolors{1};
        case 230
            colorV{i}=predefcolors{2};
        case 69
            colorV{i}=predefcolors{3};
        otherwise
            flag=1;
            while flag
                rcolor=rand(1,3);
                if ~any(cellfun(@(c) isequal(rcolor,c),predefcolors))
                    colorV{i}=rcolor;
                    flag=0;
                end
            end
        end
    end
end

%construction of the list of bus names for each tension level. Firstly the
% tension base group corresponding to a certain node is determined. Then,
% by comparing this ID with the cell array of all IDs it is possible to
% find the index and hence the tension corresponding to that ID. Another
% index, now corresponding to the position of the said tension on listV
% is found and used to concatenate to listames V cell array the name.
for i=1:LGnodes

```

```

GBi = bus.gb((Gnodesnums(i)==bus.numb),:);

found=0;
j=1;
while ~found
    if strcmp(GBi,tbgID(j,:))
        found=1;
        Vi=tbgV(j);
    end
    j=j+1;
end

idx=find(Vi==listV);
listnamesV{1,idx}=[listnamesV{1,idx};Gnodes(i)];
end

% Having the names list for each tension, the function highlight can be
% used to color the graph using the color corresponding to that list of
% names. Here the indexation previously established is very useful.
for i=1:numV

    highlight(Gplot,listnamesV{1,i},'NodeColor',colorV{i});
end
% Plotting legends
L=[];
LegV=cell(1,numV);
figure(fig)
hold on
for i=1:numV
    L=[L plot(nan,nan,'color',colorV{i})];
    LegV{1,i}=num2str(listV(i));
end
legend(L,LegV)
hold off
end

```

APÊNDICE C – FUNÇÃO PARA ELIMINAÇÃO DE ELOS CC

```

function [] = ElimElo(elo,cbus)
% Produces an ANAREDE batch to eliminate all CC ties using DCRE command.
% This command requires on the input the specification of the polarity of
% the CC tie, which is determined internally from information of the card
% DCBA provided by readPWFplus.
%
% Parameters:
% - elo: structure as read by readPWFplus function from DELO card. This
% function only uses the field elo.enum, of the CC tie number.
% - cbus: structure as read by readPWFplus function from DCBA card. This
% function only uses the fields cbus.pol, a string array with the
% polarities of each CC bus and cbus.elo, a number array with the number of
% the tie associated to that bus.

enums=num2cell(elo.enum)';
L=length(elo.enum);

%To determine if a tie is bipolar or monopolar and of which sign

polarity=cell(1,L);

for i=1:L
    polg=cbus.pol(cbus.elo==enums{i});

    cond=[num2str(ismember('+',polg)),num2str(ismember('-',polg))];

    switch cond
        case '11'
            polarity{i}='B';
        case '10'
            polarity{i}='P';
        case '01'
            polarity{i}='N';
    end
end

% Now to print the batch. The cells are organized with tie information
% distributed columnwise. The first line carries the numbers and the second,
% the polarity. By calling the resulting cell with {:} on fprintf, the
% elements are taken column by column so that it alternates numbers and
% polarities, in accordance with the string format used.
elopol=[enums;polarity];

fid=fopen('ElimElo.pwf','w');
fprintf(fid,'DCRE PCTE\n');
fprintf(fid,'%4i %s\n',elopol{:});
fprintf(fid,'99999\nFIM');
fclose(fid);
end

```

APÊNDICE D – FUNÇÃO PARA REMOÇÃO DE BARRAS INDESEJADAS

```

function [ilInums] = trimElnet(bus,ilInames)
% This function produces an ANAREDE batch to trim the electrical network,
% eliminating buses from separate graphs which are not the graph of
% interest.
%
% Parameters:
% - bus: structure with bus information as read by readPWFplus function
% from DBAR card. Only the fields bus.name and bus.numb are used.
% - ilInames: array with the names of the buses to be retained
% (use the output of bfsearch, for example).
% If your array already excludes disabled buses, which is
% guaranteed by the function PlotElNetworkGraph, this will also trim the
% disabled buses. ANAREDE automatically erases any elements connected to
% removed buses.

L=length(bus.name);
ilInums = busname2num(bus,ilInames,1);
LR=length(ilInums);
ilEnums=zeros(L-LR,1);
j=1;

% If a certain bus number isn't on the parsed vector of names, then it will
% be marked for elimination, being added to the relevant array.
for i=1:L
    if ~any(bus.numb(i)==ilInums)
        ilEnums(j)=bus.numb(i);
        j=j+1;
    end
end

fid=fopen('TRIMELNET.pwf','w');
fprintf(fid,'DBAR\n');
fprintf(fid,'%5iE\n',ilEnums);
fprintf(fid,'99999\nFIM');
fclose(fid);

end

```

APÊNDICE E – FUNÇÃO PARA ELABORAÇÃO DOS GRUPOS DE AGREGADORES

```

function [] = makeAgr(agr,bus,trimmedNetNums,equivnames,seq_aux)
% This function makes an ANAREDE batch to add an agregator group
% meant to divide the network on internal and external parts, as defined by
% the graph obtained with bfsearch. Due to software limitations, the
% external region must be divided on at least 2 parts when the internal one
% is to small, as so to avoid program crashes. Part 1 is the most external,
% part 2 is the intermediate and part 3 is the internal, to be retained.
%
% Parameters:
% - agr: structure as read by readPWFplus from DAGR card. It contains
% agregator groups data;
% - bus: structure as read by readPWFplus from DBAR card.
% - trimmedNetNums: array of numbers of buses from the relevant part of the
% network. This variable is the output of trimElnet function;
% - equivnames: vertical array of the names of the chosen equivalent
% network. It is a part of the output of bfsearch;
% - seq_aux: vertical array of the names of the intermediary equivalent
% network. Also part of the output from bfsearch, but much bigger than
% equiv names. after the first step of reduction the reduced network will
% be the one composed by these buses. The second step reduces the net
% furthermore to the desired net represented by equivnames.

seq_auxnums=busname2num(bus,seq_aux,1);
equivnums = busname2num(bus,equivnames,1);
Leq=length(equivnums);
Laux=length(seq_auxnums);
Ltrm=length(trimmedNetNums);
Lext1=Ltrm-Laux;
Lext2=Laux-Leq;
extnums1=zeros(Lext1,1);
extnums2=zeros(Lext2,1);

%separating the external network numbers
j=1;
k=1;
for i=1:Ltrm

    if ~any(trimmedNetNums(i)==seq_auxnums)
        extnums1(j)=trimmedNetNums(i);
        j=j+1;
    else
        if ~any(trimmedNetNums(i)==equivnums)
            extnums2(k)=trimmedNetNums(i);
            k=k+1;
        end
    end
end

%creating agregator groups and assignin to buses the corresponding
%agregator. 1 and 2 refer to part 1 and part 2 of the external network, and
%therefore, should be eliminated and 3 refers to the internal network.

```

```

fid=fopen('AGRFORNET.pwf','w');

% checking for pre-existence of agregator card and acting accordingly

if ~agr.has_agr
    %agregator card ID in case it is the first
    fprintf(fid,'DAGR\n001 DIV PARA EQUIVALENTE\n');
else
    if length(agr.ID.num)>=10
        fprintf(1,'The pwf case loaded already has the maximum of 10
agregator groups. Erase some of them to use this function');
    else
        %The agregator ID for equivalent operation is assigned to the next
        %available agregator ID.

        agrnxtnum=agr.ID.num(end)+1;
        fprintf(fid,'DAGR\n00%i DIV PARA EQUIVALENTE\n',agrnxtnum);
    end
end

% Agregator card instances
fprintf(fid,'001 A REDE EXTERNA PARTE 1\n');
fprintf(fid,'002 A REDE EXTERNA PARTE 2\n');
fprintf(fid,'003 A REDE INTERNA\nFAGR\n99999\n');
%bus agregator information
fprintf(fid,'DBAR\n');
uns=cell(1,Lext1);
uns(:)={'001'};
exttab1=[num2cell(extnums1');uns];
fprintf(fid,'%5iM%78s\n',exttab1{:});
doiss=cell(1,Lext2);
doiss(:)={'002'};
exttab2=[num2cell(extnums2');doiss];
fprintf(fid,'%5iM%78s\n',exttab2{:});
treiss=cell(1,Leq);
treiss(:)={'003'};
eqtab=[num2cell(equivnums');treiss];
fprintf(fid,'%5iM%78s\n',eqtab{:});
fprintf(fid,'99999\nFIM');
fclose(fid);
end

```

APÊNDICE F – FUNÇÃO PARA OBTENÇÃO DO NÚMERO DA BARRA A PARTIR DO NOME

```

function [seqnums] = busname2num(bus, seqnames, optrepeat)
% This function obtains the sequence of bus numbers from a sequence of
% busnames without repetitions. Use names from obtained from Graph objects.
% This sequence of names must of course be a subset of bus.names
%
% Parameters:
% - bus: structure as obtained by readPWFplus;
% - seqnames: is a vertical array of strings or a vertical cell array of
% strings containing the names for which you want to obtain the
% corresponding numbers;
% - optnames: enter 1 or 0;
% Beware repeated cell names!!! If you want to list all numbers of
% repeated names, enter 1 (use with trimElNet).
% If you wish only one number per repeated name, enter 0 (useful for graph
% painting with colorElNetGraph.

Lseq=length(seqnames);
if optrepeat
    seqnums=[];
    busnamesc=cellstr(bus.name);
    for i=1:Lseq
        seqnums = [seqnums; bus.numb(strcmp(seqnames(i),busnamesc))];
    end

else

seqnums=zeros(Lseq,1);

for i=1:Lseq
    j=1;
    found=0;
    while ~found
        if strcmp(bus.name(j,:),seqnames(i,:))
            seqnums(i)= bus.numb(j);
            found=1;
        end
        j=j+1;
    end
end
end

end

```

APÊNDICE G – FUNÇÃO PARA OBTENÇÃO DA ESTRUTURA DE ADJACÊNCIA DE UM GRAFO

```

function [adjstru] = AdjacencyStructure(bus,line,csc)
% function to build the adjacency structure representation of the graph of
% an electrical network.
%
% Parameters:
% - bus, line and csc are structures containing bus, line and series
% compensator information, respectively, as read by readPWFplus.

busnumbs=bus.numb;
busState=cellstr(bus.stat);
busnames=cellstr(bus.name);
busfl=line.busf;
bustl=line.bust;
lineState=cellstr(line.stat);
fswState=cellstr(line.fsst);
tswState=cellstr(line.tsst);
busfcs=csc.busf;
bustcs=csc.bust;
cscState=cellstr(csc.stat);

% First off, we need to check for disabled buses and lines and erase their
% entries, otherwise, we will draw an inaccurate graph. On this
% implementation, beyond excluding disabled lines and lines with one of the
% terminals open it was also necessary to make empty all the lines which
% had at one of its end a disabled bus. It seems that even excluding the
% disabled lines and partially opened lines there were still cases of
% lines incident on disabled buses that had to be removed.

disbuslogic=strcmp(busState,'D');
disbuses=busnumbs(disbuslogic);
L=length(busfl);
dislinelogic=false(L,1);
for i=1:L
    if any(disbuses==busfl(i)|disbuses==bustl(i))
        dislinelogic(i)=1;
    end
end
dislinelogic=strcmp(lineState,'D')|strcmp(fswState,'D')|strcmp(tswState,'D')
)|dislinelogic;
discsclogic=strcmp(cscState,'D');

busnumbs(disbuslogic)=[];
busnames(disbuslogic)=[];
busfl(dislinelogic)=[];
bustl(dislinelogic)=[];
busfcs(discsclogic)=[];
bustcs(discsclogic)=[];

%The variable below refers to the number of enabled buses only, not the
%total number.
nbuses=length(busnumbs);

```

```

%concatenating the from and to buses
busf=[busfl;busfcs];
bust=[bustl;bustcs];

nlines=length(bust);
% To make the adjacency structure without repeated names it is necessary to
% remove repeated from-to pairs.
% To ease up the process, all the entries are organized with the "from"
% bus number smaller than the "to" number. When this doesn't happen, the
% order is changed.

for i=1:nlines
    if busf(i)>bust(i)
        aux=busf(i);
        busf(i)=bust(i);
        bust(i)=aux;
    end
end
% Now both arrays are concatenated in a single variable and the function
% unique is used to remove repeated pairs "from-to". The parameter 'rows'
% indicates that we want the function to remove repeated rows from the
% matrix.
% The function unique also sorts the output. Note that the change in order
% does not affect the results obtained

busft=unique([busf bust],'rows');

% Therefore, the above variable contains non repeated "from-to" pairs on
% sorted order. Below the length of this new vector is computed

nlinesu=length(busft(:,1));
% It would also be convenient to sort the bus numbers to ensure that the
% indexes of the entries of the adjacency structure are the same as
% the bus numbers, avoiding the need to search for a certain bus number
% when assigning connected bus numbers on the adjacency array.
% But, on the files to be analyzed, some numbers don't correspond to any
% bus. So another approach must be implemented.
%
% A vector named busindex, of length equal to the max bus number,
% will store the indexes of buses in the order they were read from the
% file. When a number doesn't have an associated bus, its entry remain
% zero.
%
%
busindex=zeros(max(busnumbs));
for i=1:nbuses
    busindex(busnumbs(i))=i;
end

%initializing the adjacency structure, abbreviated as adjstru. The
%cell array has 3 lines: the first carries the bus numbers;
%The second carries the
%bus names; and the third, the adjacency arrays containing the names of
%bars connected to that column's bar.
adjstru=cell(1,nbuses);
adjstru=[num2cell(busnumbs)';busnames'; adjstru];

% Then the adjacency lists are created for each bar, concatenating every
% entry of bust to its respective from bar column and vice-versa
% Numbers are used on the adjacency lists to avoid problems with repeated

```

```
% names.  
for i=1:nlinesu  
    busfrom=busft(i,1);  
    busto=busft(i,2);  
    adjstru{3,busindex(busfrom)}=[adjstru{3,busindex(busfrom)};busto];  
    adjstru{3,busindex(busto)}=[adjstru{3,busindex(busto)};busfrom];  
  
end  
  
end
```

APÊNDICE H – FUNÇÃO DE BUSCA EM LARGURA COM OPÇÃO DE NÍVEL

```

function [search_levelled_seq, equivseq] =
LevelBfsrch(adjstru,rootbus,maxlevel,nmax)
% Function that performs a Breadth-first search on the graph described by
% an adjacency structure, starting on a given node (bus). It returns the
% complete sequence of bus names by order of finding and also the desired
% equivalent up to a certain level and with no more than a certain number
% of buses.
%
% Parameters:
% - adjstru: Adjacency structure. Use the output of the AdjacencyStructure
% function;
% - rootbus: The name of the bus with which to start the search;
% - level: The level up to which the equivalent will contain;
% - nmax: The maximum number of buses on the equivalent sequence.
% It is possible that levels are not represented on its entirety depending
% on the combination of the last two variables.

% variable initialization.
% The first step is made below, defining the level one adjacency of
% rootbus.
% Current_level_nodes is the variable that shall carry the numbers of the
% buses of the current level and current_level is a variable that carries
% the level number. searchseq and levels are its total counterparts.
busnames=adjstru(2,:);
busnumbs=adjstru(1,:);
busnumbs=[busnumbs{:}];
rootnumb=adjstru{1,strcmp(rootbus,busnames)};
current_level_nodes=adjstru{3,strcmp(rootbus,busnames)};
Lcseq=length(current_level_nodes);
current_level=ones(Lcseq,1);
level=1;
searchseq=[rootnumb;current_level_nodes];
levels=[0;current_level];

% To implement this in a non recursive way, a flag is created which
% indicates if the sequence grew. The algorithm only stops when no bus is
% added to searchseq, meaning the end of the search. For this to work
% seqgrowth is set to zero at the start and can only be set to one if there
% any of the elements of the queue to be evaluated are new to the sequence.
% This queue is composed of the list of all buses tied to the
% current_level_nodes.
%
seqgrowth=1;

while seqgrowth

    seqgrowth=0;
    queue=[];
    Lcseq=length(current_level_nodes);

    for i=1:Lcseq
        queue=[queue;adjstru{3,current_level_nodes(i)==busnumbs}];
    end
end

```

```

end

Lqueue=length(queue);
current_level_nodes=[];
Lcseq=0;
for i=1:Lqueue
    if ~any(queue(i)==searchseq)
        searchseq=[searchseq;queue(i)];
        current_level_nodes=[current_level_nodes;queue(i)];
        Lcseq=Lcseq+1;
        seqgrowth=1;
    end
end

if seqgrowth
    level=level+1;
    current_level=(ones(Lcseq,1))*level;
    levels=[levels;current_level];
end
end

% Now the node names are obtained to compose the output. Its first column
% carries the node numbers, its second, the names and its third, the level,
searchseqn=[];
for i=1:length(searchseq)
    searchseqn=[searchseqn; busnames(searchseq(i)==busnumbs)];
end

search_leveled_seq=[num2cell(searchseq),
cellstr(searchseqn),num2cell(levels)];

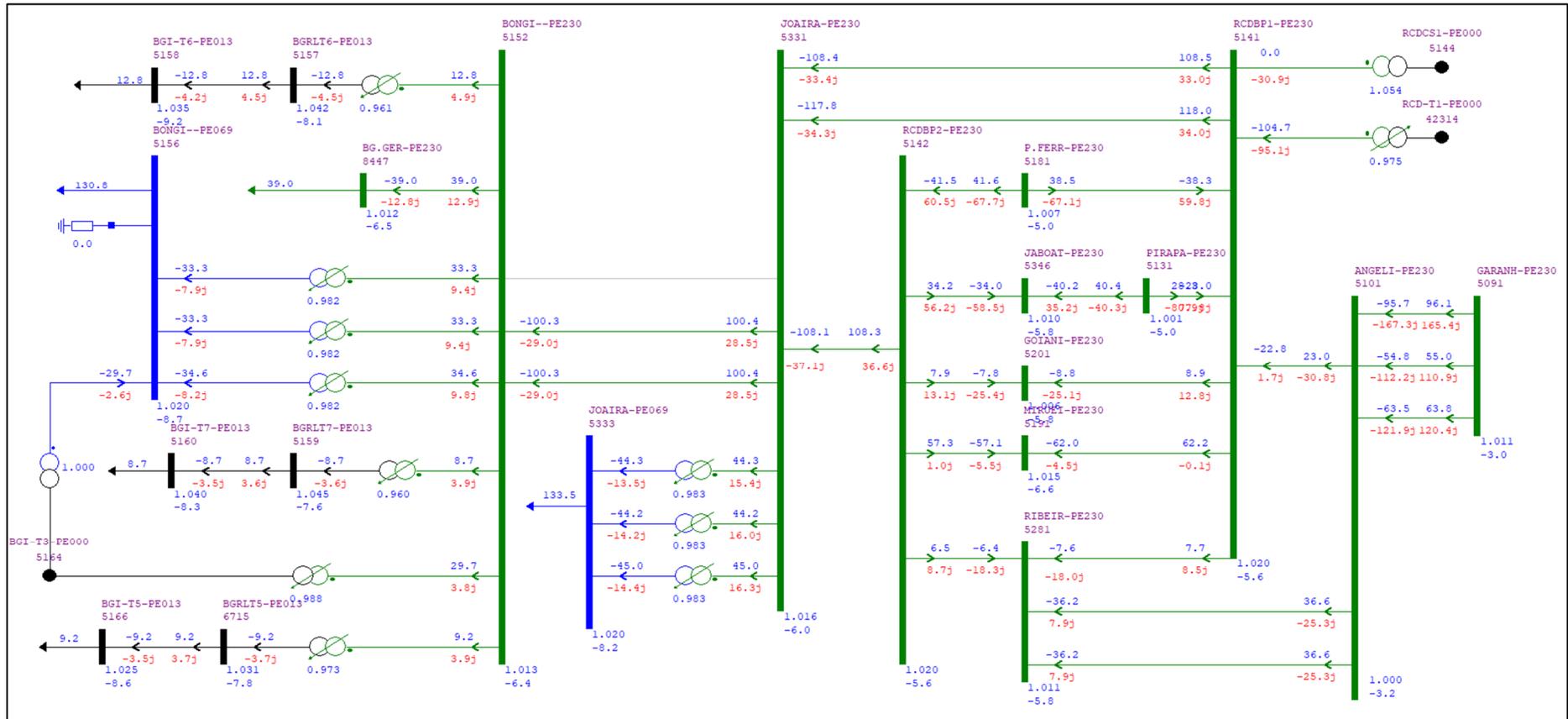
% The the limit conditions are verified. Below is the length of the
% sequence up to the max neighboring level specified. If this length is
% greater than nmax, nmax is used, else L_equivseq is used. This output is
% also a cell just like search_leveled_seq.
L_equivseq = length(levels(maxlevel>=levels));

if L_equivseq>nmax
    equivseq=[num2cell(searchseq(1:nmax)),cellstr(searchseqn(1:nmax,:)),num2cell
    (levels(1:nmax))];
else
    equivseq=[num2cell(searchseq(1:L_equivseq)),cellstr(searchseqn(1:L_equivseq
    ,:)),num2cell(levels(1:L_equivseq))];
end

end

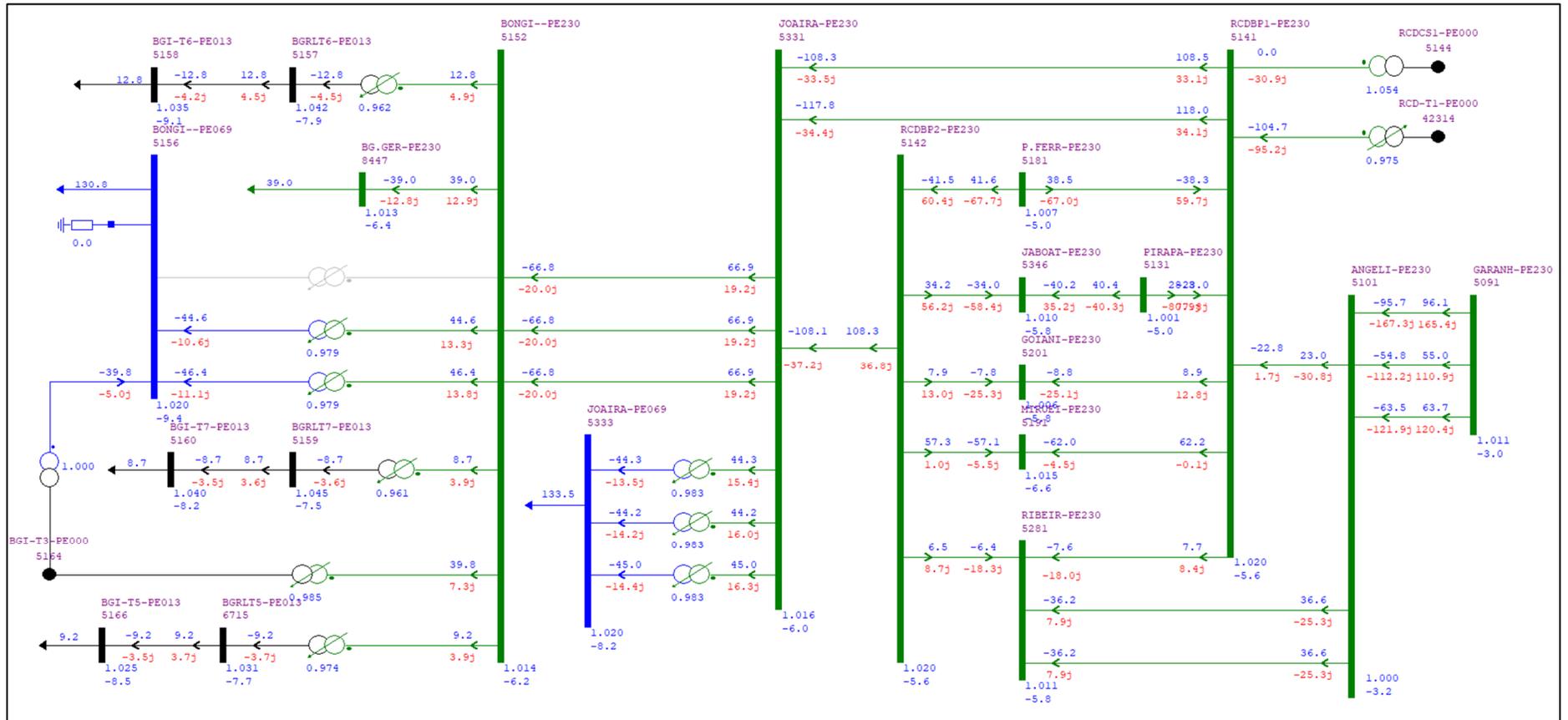
```


Figura 45 – Caso reduzido contingência 1



Fonte: O autor (2022)

Figura 47 – Caso reduzido contingência 2



Fonte: O autor (2022)