

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL BRATIFICH

**PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO
EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

RAFAEL BRATIFICH

**PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO
EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 (EL10A), do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Rozas Theodoro

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafael Bratifich

Análise de ilhamento controlado em redes de energia elétrica

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:00hs do dia 06/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). André Luís Shiguemoto - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - (Membro)

Dedico este trabalho aos meus pais Sérgio e Izinita, a minha irmã Verônica, minha sobrinha Hayllee e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. Muito obrigado!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Edson Aparecido Rozas Theodoro, pela orientação, paciência e comprometimento que tornaram este trabalho possível.

Ao Prof. Dr. Danilo Hernane Spatti pela ajuda com as implementações dos algoritmos de inteligência computacional.

Ao Prof. Dr. Bruno Catarino Bispo por seu auxílio na publicação de parte deste trabalho no VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2018).

Aos docentes das disciplinas que participei na Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Cornélio Procópio, por proporcionarem-me desafios cujas soluções ampliaram minha visão como discente, ser humano e profissional.

A todos os funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná que com seu empenho e dedicação melhoram a cada dia esta instituição.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio o previne. ALBERT EINSTEIN - Físico e Pensador alemão (1879-1955)

RESUMO

BRATIFICH, Rafael. **Projeto de ilhamento controlado em redes de energia elétrica**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

Na área de sistemas elétricos de potência (SEP) o projeto de ilhamento controlado visa a separação física do sistema de rede de energia elétrica em subsistemas independentes (grupos de geradores coerentes) para promover a continuidade do fornecimento de energia elétrica na presença de uma falha crítica na qual os sistemas de proteção usuais não são capazes de atuar de forma efetiva e manter a rede operando totalmente interconectada. O projeto de ilhamento, seleção dos elementos a serem desativados para promover a separação da rede em subsistemas, pode ser modelado como um problema de otimização no qual se pode empregar a teoria grafo-algébrica para associar o SEP a uma matriz incidência nó-ramo e utilizar as características intrínsecas dessa matriz para realizar processos de pesquisa no grafo (associado ao SEP) de forma mais eficiente e encontrar o conjunto de corte que otimiza a função custo (objetivo) do problema. Neste trabalho são elaborados dois algoritmos, um grafo-algébrico e um algoritmo genético, ambos baseados no algoritmo grafo-algébrico de fatoração triangular inferior para projetar o ilhamento controlado em redes de energia elétrica que promova a seleção do menor fluxo de potência ativa interrompido entre os subsistemas separados.

Palavras-chave: Otimização. Ilhamento controlado. Método grafo-algébrico. Algoritmo genético. Redes de energia elétrica.

ABSTRACT

BRATIFICH, Rafael. **Project of controlled islanding in electrical energy networks**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Controlled islanding is implemented in electrical power systems (EPS) to achieve the physical separation of the network into independent subsystems (sets of coherent generators) to promote the continuity of electrical energy supply in the presence of a critical fault, during which usual protection systems are not able to operate effectively and maintain the network operation in a fully interconnected manner. The islanding project, in which the elements to be shut down are selected in order to separate of the network into subsystems, can be modeled as an optimization problem in which the algebraic graph theory can be applied to associate the EPS with a branch-node incidence matrix, and use the inherent characteristics of this matrix to carry out research in the graph (associated to EPS) more efficiently and to find the cut-set that optimizes the cost (objective) function of the problem. In this work, we present an algebraic graph algorithm and a genetic algorithm, both of which are based on the lower triangular factorization of the node-branch matrix, to design controlled islanding in power networks, in order to obtain the smallest active power flow between the subsystems to be separated.

Keywords: Optimization. Controlled islanding. Graph-algebraic method. Genetic algorithm. Electric power system.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DOS MÉTODOS GRAFO-ALGÉBRICOS.....	15
2.1	Teoria de Grafos.....	15
3	MÉTODO GRAFO-ALGÉBRICO PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO BASEADO NA FATORAÇÃO TRIANGULAR INFERIOR ORDENADA.....	21
3.1	Formulação do problema.....	21
3.2	Método grafo-algébrico baseado na fatoração triangular inferior ordenada.....	22
3.2.1	Aplicação do método grafo-algébrico baseado na fatoração triangular inferior ordenada.....	24
4	MÉTODO GRAFO-ALGÉBRICO PARA A ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO BASEADO NA FORMAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ILHAMENTO.....	29
4.1	Método grafo-algébrico baseado na formação de domínios deilhamento.....	29
4.1.1	Exemplo de aplicação da metodologia.....	33
4.1.2	Aplicação do método grafo-algébrico baseado na formação de domínios de ilhamento.....	37
5	ALGORITMO GENÉTICO APLICADO A ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO.....	45
5.1	Algoritmo Genético (AG).....	45
5.2	Algoritmo genético associado ao método grafo-algébrico proposto.....	49
5.2.1	Construção da população inicial de indivíduos.....	50
5.2.2	Avaliação dos Indivíduos.....	51
5.2.3	Processo de recombinação e mutação.....	54
5.2.4	Critérios de parada.....	56
5.2.5	Apresentação dos melhores indivíduos.....	56
5.3	Algoritmo genético associado ao método grafo-algébrico proposto.....	57
5.3.1	Aplicação do algoritmo genético.....	58
5.3.1.1	Aplicação do algoritmo genético em um sistema de 9 barras.....	60
5.3.1.2	Aplicação do algoritmo genético em um sistema de 16 barras.....	62
5.3.1.3	Aplicação do algoritmo genético em um sistema de 33 barras.....	64

6	OTIMIZAÇÃO DO VALOR LIMITE DO MÉTODO GRAFO-ALGÉBRICO BASEADO NA FORMAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ILHAMENTO.....	67
6.1	Valor limite do domínio (ε)	67
6.2	Processo iterativo de atualização do valor limite.....	68
6.2.1	Aplicação do algoritmo grafo-algébrico no sistema de 6 barras.....	71
6.2.2	Aplicação do algoritmo grafo-algébrico no sistema de 9 barras.....	72
6.2.3	Aplicação do algoritmo grafo-algébrico no sistema de 16 barras.....	73
6.2.4	Aplicação do algoritmo grafo-algébrico no sistema de 33 barras.....	74
7	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	77
7.1	Conclusões.....	77
7.2	Perspectivas futuras.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81
	APÊNDICE A – Publicações referentes a esta pesquisa.....	83

1 INTRODUÇÃO

No Brasil os sistemas elétricos de potência (SEPs) estão a se integrar cada vez mais, conectando o maior número de fontes geradoras (usinas) e cargas (centros consumidores), para promover uma geração e despacho de energia eficientes e inteligentes, reduzindo os custos da geração e as perdas na distribuição e, assim, melhorando a qualidade da energia elétrica e confiabilidade do sistema.

Um dos grandes benefícios da integração do sistema é a organização e controle eficiente do despacho da energia aos grandes centros consumidores, que permite regular a geração hidrelétrica para suprimir a sazonalidade das bacias hídricas no país garantindo o melhor despacho energético e econômico possível.

A integração dos sistemas brasileiros foi denominada de sistema interligado nacional (SIN) e consiste na interconexão de quatro subsistemas elétricos brasileiros (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte) em uma malha complexa de transmissão de energia conectando as 5 regiões do país (SISTEMA..., 2014).

A integração dos sistemas aumentou a complexidade das malhas de transmissão e, conseqüentemente, o seu controle e operação, tornando-o mais susceptível a perturbações como: faltas e variações bruscas na potência gerada e/ou consumida que podem progredir para um cenário de instabilidade (TAKAHASHI, 2013).

As perturbações no sistema junto ao crescente aumento da demanda que pode elevar o ponto de operação dos geradores próximo a seu limite de estabilidade angular podem promover distúrbios críticos (perda de sincronismo entre os geradores) gerando o colapso do sistema, desligamento de todas as cargas (KUNDUR, 1994).

Na presença de um distúrbio crítico, quando há perda do sincronismo entre os geradores, adota-se como última medida corretiva a separação física da rede em subsistemas de grupos de geradores coerentes (geradores síncronos) para possibilitar o fornecimento da energia elétrica para as cargas visto que as operações de correção e controle usualmente utilizadas como: manobras, desligamento da rede e o corte de cargas (COPEL, 2010) não reestabelecerão o sincronismo entre os geradores e a rede permanecerá impossibilitada de operar interconectada (VITTAL; HEYDT, 2009).

Dessa forma, o projeto de ilhamento controlado propõe a separação física intencional da rede em subsistemas garantindo a operação do SEP. Assim, o projeto de ilhamento controlado deve promover a formação de subsistemas equilibrados com o menor desbalanço entre a geração de potência ativa do grupo de geradores coerentes e o consumo das cargas impedindo o colapso do SEP após a ocorrência de um distúrbio crítico (SOUZA, 2014).

A elaboração do projeto é, geralmente, dividida em duas etapas (YOU et al., 2004):

- Na primeira etapa, promove-se o estudo da dinâmica do SEP avaliando a situação de contingência a fim de determinar os grupos de geradores coerentes e;
- Na segunda etapa, após o estudo da dinâmica, é realizada a avaliação dos conjuntos de corte, equipamentos a serem desligados, que promoverão a separação do SEP nos subsistemas adotados a partir dos grupos de geradores coerentes encontrados.

A seleção do conjunto de corte pode ser modelada através de um problema de otimização empregando-se a teoria grafo-algébrica de modo a maximizar ou minimizar uma função custo (objetivo) do problema como: promover o menor corte de carga para estabelecer o melhor balanceamento entre a relação carga-geração das ilhas formadas, minimizar o número de equipamentos de transmissão desligados ou a interrupção de contratos de compra e venda de energia elétrica, entre outros (WANG; VITTAL, 2004).

A teoria grafo-algébrica permite associar o SEP a um grafo e representar sua topologia através de uma matriz incidência nó-ramo que habilita processos eficientes de: busca, realização de cálculos e extração de informações devido a características estruturais intrínsecas dessa representação (SAVULESCO, 1980).

Desse modo, há várias pesquisas direcionadas para projetos de ilhamento (seleção de corte) que utilizam métodos grafo-algébricos tais como: o método proposto por Wang e Vittal (2004) de interrupção mínima de fluxo de potência, o método proposto por Sun et al. (2006) de estabelecimento de ilhas dinamicamente estáveis a fim de evitar colapsos parciais dos subsistemas, o método proposto por Ding et al. (2015) de minimização da interrupção do fornecimento de energia para as cargas evitando o corte de carga e o método proposto por Souza (2014) e Theodoro et al. (2014) de seleção de conjunto de corte utilizando a fatoração triangular inferior ordenada que apresenta candidatos a minimização da

potência ativa interrompida entre as ilhas e/ou do número de equipamentos desativado para a formação do ilhamento.

Na área de SEP, além dos métodos grafo-algébricos utilizados em projetos de ilhamento, vem sendo empregado com grande eficiência para a solução de problema de otimização complexos métodos baseados na inteligência computacional como algoritmos genéticos (LIN *et al.*, 2000) e algoritmos bio-inspirados (CHANG, 2008; CHANG; KUO, 1994; SEDIGHIZADEH *et. al*, 2014) envolvendo problemas de otimização de fluxo de potência (AMORIN, ROMERO; MANTOVANI, 2009) e alocação de capacitores (CARVALHO, 2015).

Assim, diante da importância para a segurança e controle das redes elétricas em cenários de distúrbio crítico apresentam-se dois novos algoritmos de seleção de conjuntos de corte para o projeto de ilhamento controlado baseados no método grafo-algébrico proposto por Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) para promover à menor interrupção de fluxo de potência ativa entre as ilhas e estabelecer o equilíbrio (menor desbalanço na relação geração-carga) dos subsistemas sem a necessidade do corte adicional de cargas nas ilhas pretendidas. Os novos métodos propostos são elaborados através da teoria grafo-algébrica e do uso de algoritmos genéticos.

Para melhor compreensão das metodologias apresentadas divide-se o presente trabalho nos seguintes capítulos:

- No capítulo 2 é apresentado uma breve revisão da teoria grafo-algébrica aplicada a metodologia proposta;
- No capítulo 3 é apresentado o método grafo-algébrico de ilhamento controlado elaborado por Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014);
- No capítulo 4 é apresentado o método grafo-algébrico baseado na formação de domínios de ilhamento proposto neste trabalho;
- No capítulo 5 é apresentado um algoritmo genético baseado no método grafo-algébrica proposto;
- No capítulo 6 é apresentado uma função para otimizar o valor limite do domínio do método grafo-algébrica proposto e;
- No capítulo 7 é apresentado as conclusões do trabalho.

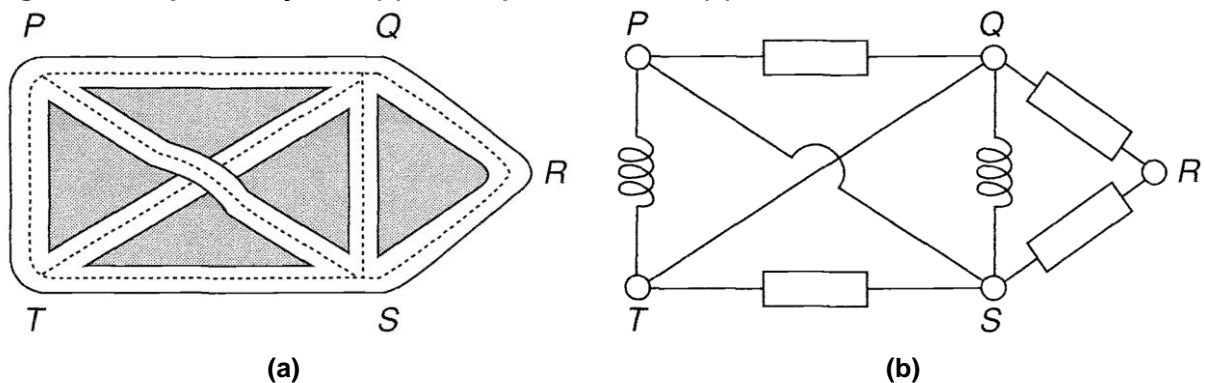
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DOS MÉTODOS GRAFO-ALGÉBRICOS

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos mais relevantes da teoria de grafo para a melhor compreensão do método grafo-algébrico apresentado neste trabalho.

2.1 Teoria de Grafos

A teoria dos grafos é uma área da matemática que estuda as relações entre objetos de um determinado conjunto. Considere a Figura 1 que representa um mapa rodoviário e um circuito elétrico.

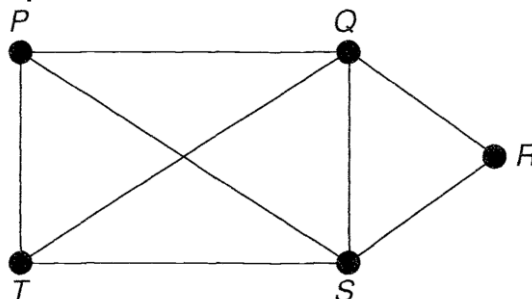
Figura 1 – Representação de (a) Um mapa rodoviário e (b) Um circuito elétrico.



Fonte: Wilson (1996, p. 1)

Pode-se representar a topologia dessas figuras através de um grafo equivalente apresentado no Figura 2.

Figura 2 – Grafo $G(N, \mathcal{E})$ equivalente ao mapa rodoviário e ao circuito elétrico.

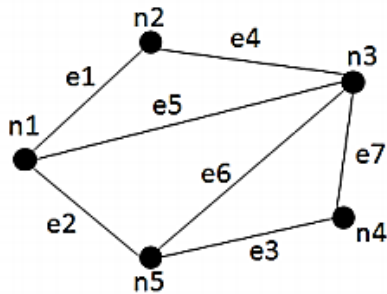


Fonte: Wilson (1996, p. 2)

No grafo associado à Figura 2, os pontos P , Q , R , S e T representam os vértices ou nós do grafo e os segmentos \overline{PQ} , \overline{PS} , \overline{PT} , \overline{QS} , \overline{QR} , \overline{QT} e \overline{RS} representam

as arestas ou ramos do elemento. Desse modo, pode-se definir um grafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ como um conjunto finito não-vazio \mathcal{N} com n_i elementos chamados vértices (ou nós), e um conjunto finito \mathcal{E} de $e_i = \{n_i, n_j\}$ pares não ordenados distintos de elementos distintos de \mathcal{N} denominados de arestas como é representado na Figura 3 (SOUZA, 2014; WILSON, 1996).

Figura 3 – Grafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ com 5 nós e 7 ramos.



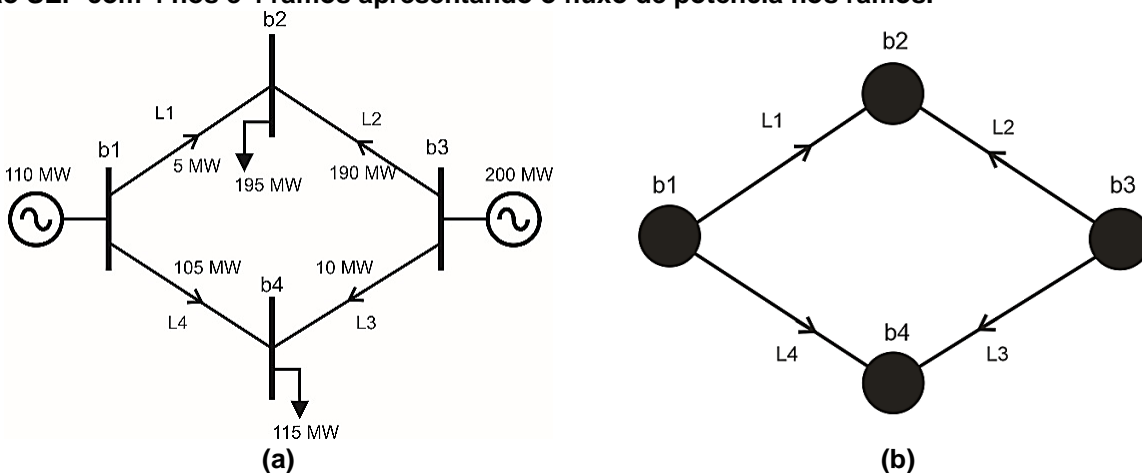
$$\mathcal{N} = \{n1, n2, n3, n4, n5\}$$

$$\mathcal{E} = \{e1, e2, e3, e4, e5, e6, e7\}$$

Fonte: Souza (2014, p. 16)

Os grafos podem ser direcionados (dígrafos) ao adotar-se uma pseudo-orientação das arestas que conectam os nós i e j de modo a representar uma hierarquia entre os nós, um sentido de caminho ou fluxo entre os nós como é apresentado na Figura 4 (SOUZA, 2014; WILSON, 1996).

Figura 4 – (a) Sistema Elétrico de Potência 4 barras / 4 linhas e (b) Dígrafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ equivalente ao SEP com 4 nós e 4 ramos apresentando o fluxo de potência nos ramos.



Fonte: Adaptada de Theodoro *et al.* (2014, p. 5).
Autoria própria.

Na associação do topologia do sistema elétrico de potência (SEP) da Figura 4(a) ao dígrafo equivalente, os nós (vértices) do grafo representam os barramentos do sistema ($b1, b2, b3$ e $b4$) e os ramos (arestas) representam os

equipamentos de transmissão ($L1$, $L2$, $L3$ e $L4$) enquanto os sentidos do fluxo de potência nas linhas de transmissão são representados através da pseudo-orientação nos ramos.

Para representar a topologia do grafo utiliza-se a matriz incidência nó-ramo ($H_{m \times n}$) apresentada na equação 1, na qual os elementos h_{ij} da matriz são definidos através das conexões entre os nós que compõem o grafo e a pseudo-orientação dos ramos é definida conforme a regra que melhor represente o sistema elétrico de potência a ser associado ao grafo.

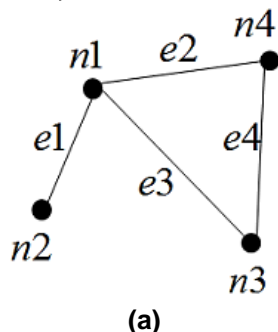
$$H_{m \times n} = \begin{matrix} & e1 & e2 & \dots & en \\ \begin{matrix} n1 \\ n2 \\ \vdots \\ nm \end{matrix} & \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Assim, a matriz incidência nó-ramo pode ser construída adotando-se, por exemplo, a pseudo-orientação dos ramos dada por (SOUZA, 2014):

$$h_{ij} = \begin{cases} 1(-1), & \text{se o ramo "j" é conectado ao nó "i" no ponto inicial (final)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

Desse modo, considerando o grafo representado na Figura 5(a) e a equação 2 constrói-se a seguinte matriz incidência nó-ramo:

Figura 5 – (a) Grafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ com 4 nó e 4 ramos e (b) Matriz incidência nó-ramo da topologia do grafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$.



$$H = \begin{matrix} & e1 & e2 & e3 & e4 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} n1 \\ n2 \\ n3 \\ n4 \end{matrix} \end{matrix} \quad (b)$$

Fonte: Souza (2014, p. 17).

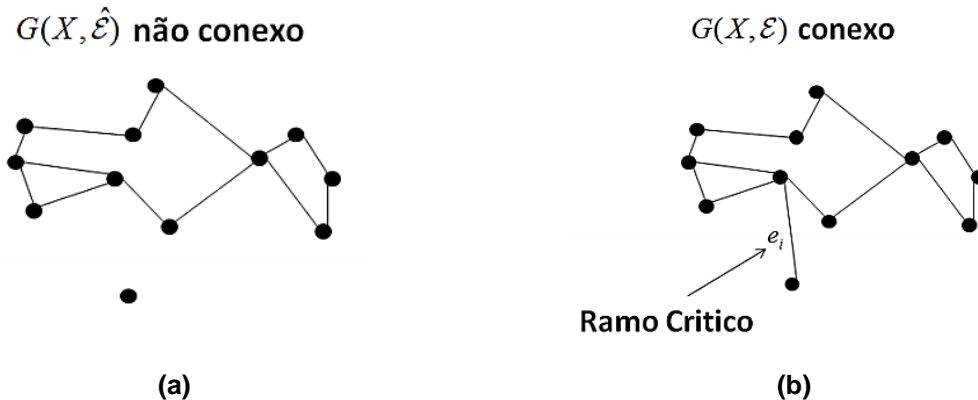
Utilizando a matriz incidência nó-ramo é possível avaliar o grafo através de métodos heurísticos que permitem encontrar a solução para o problema

abordado conforme algum critério a ser otimizado.

A análise dos nós e ramos no grafo possibilita a construção de um caminho que é uma sequência de ramos $e_k = \{e_i, \dots, e_j\}$ com $i \neq j$ que conecta dois nós através de uma sequência de nós $\{n_k, \dots, n_j\}$ com $n_k \neq n_j$ gerando a solução do problema avaliado (SOUZA, 2014).

Conforme a complexidade do grafo podem haver inúmeros caminhos entre os dois nós avaliados, entretanto, se não houver ao menos um caminho que conecte todo par de nós no grafo é dito que o grafo é desconexo, como apresentado na Figura 6 (a), e se todo par é conectado através de um caminho é dito que grafo é conexo, porém, se existe um único ramo que conecta um par de nós e caso esse ramo for removido e o grafo torne-se desconexo tal ramo é denominado ramo crítico como é apresentado na Figura 6 (b) (SOUZA, 2014).

Figura 6 – (a) Grafo $G(\mathcal{N}, \hat{\mathcal{E}})$ desconexo e (b) Grafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ conexo com ramo crítico.



Fonte: Souza (2014, p. 18).

Dessa forma, associando o SEP ao grafo busca-se encontrar um conjunto de ramos, denominado conjunto de corte $\mathcal{C}(X, X') = \{e_i, \dots, e_j\}$ com $i \neq j$, que quando removido promova separação do grafo em dois subgrafos conexos $((X, X') \subset \mathcal{N})$ e otimize a função custo $(J(\mathcal{C}(X, X')))$ do problema dada por (SOUZA, 2014):

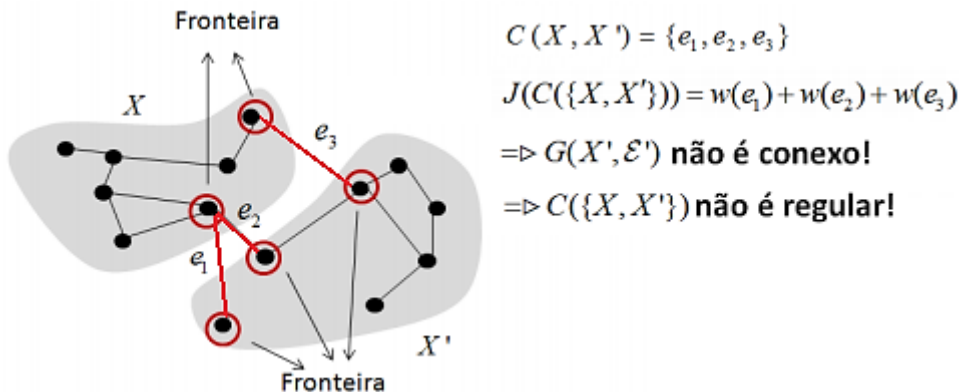
$$J(\mathcal{C}(X, X')) = \sum_{e_i \in \mathcal{C}(\{X, X'\})} w(e_i) \quad (3)$$

com $w(e_i)$ representando o peso da perda do ramo e_i .

Os nós interligados através dos ramos presentes no conjunto de corte $(\mathcal{C}(\{X, X'\}))$ são denominados de fronteira de corte enquanto ramo é denominado

corte. O conjunto de corte que promova a formação de um subgrafo desconexo é chamado de conjunto de corte não regular enquanto o conjunto de corte que promova a formação de subgrafos conexos é denominado conjunto de corte regular.

Figura 7 – Exemplo de conjunto de corte $C(\{X, X'\})$ formando um subgrafo desconexo $G(X', \mathcal{E}')$.



Fonte: Adaptada de Souza (2014, p. 19).

Para o funcionamento correto do SEP após o processo de ilhamento é fundamental encontrar conjuntos de corte regulares que promovam a formação de subgrafos conexos e otimizem a função de custo do problema. Para realizar tal tarefa utiliza-se à fatoração triangular inferior da matriz incidência nó-ramo associada ao SEP.

A fatoração triangular consiste na decomposição-LU da matriz incidência nó-ramo realizada por linhas, de modo que ao final do processo de decomposição observa-se uma matriz triangular inferior, ou seja, todos os elementos da matriz h_{ij} para $i < j$ são nulos (THEODORO *et al.*, 2012).

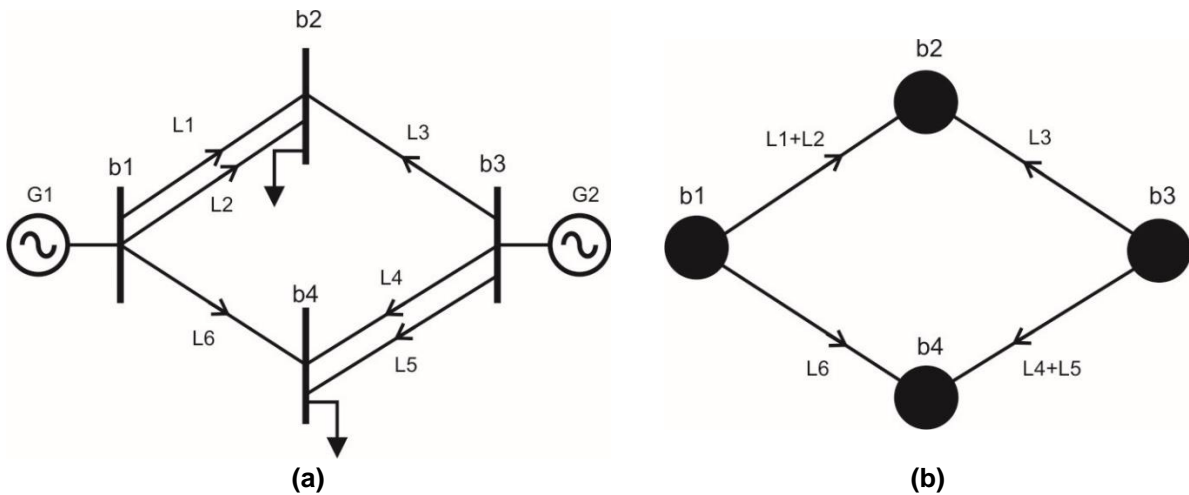
A decomposição LU da matriz incidência nó ramo é realizada através da soma das linhas da matriz (THEODORO *et al.*, 2012) como pode ser observado na equação 4 para a matriz incidência nó-ramo da Figura 5.

$$H = \begin{matrix} & e1 & e2 & e3 & e4 \\ \begin{matrix} n1 \\ n2 \\ n3 \\ n4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & \rightarrow & \begin{matrix} n1 \\ n1 + n2 \\ n1 + n2 + n4 \\ n1 + n2 + n4 + n3 \end{matrix} & \begin{matrix} e1 & e2 & e3 & e4 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \end{matrix} & (4)$$

É importante destacar, na construção da matriz incidência nó-ramo é necessário que o grafo associado ao SEP apresente somente ramos simples entre

dois nós conectados. Assim, todo conjunto de linhas compostas entre duas barras conectadas no SEP será simplificado no grafo para um ramo equivalente como demonstrado na Figura 8.

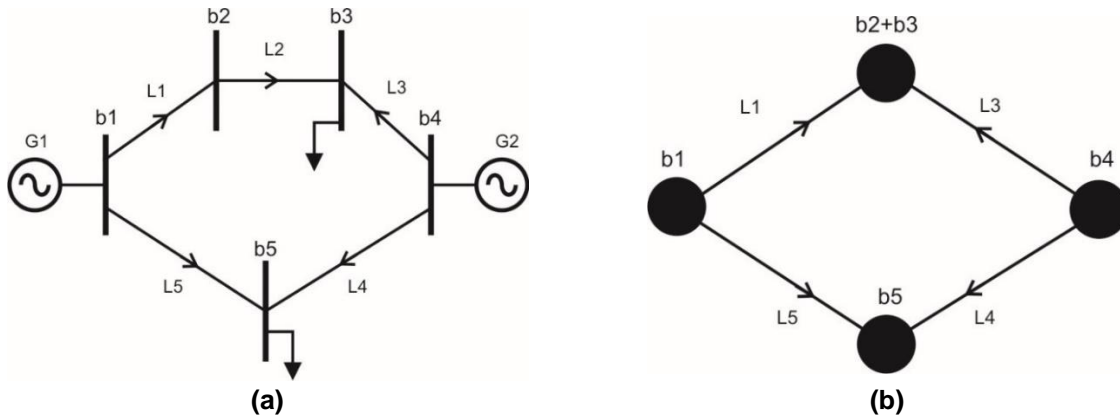
Figura 8 – (a) Sistema Elétrico de Potência 4 barras / 6 linhas e (b) Dígrafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ equivalente ao SEP com 4 nós e 4 ramos apresentando o fluxo de potência nos ramos.



Fonte: Adaptada de Theodoro *et al.* (2014, p. 5).
 Autoria própria.

Além dos ramos compostos, deverão ser simplificadas as barras de passagem, barras sem carga, conectando diretamente as barras de carga na associação do SEP ao grafo. A simplificação da barra de passagem dar-se-á aglutinando a barra de passagem junto a barra de carga a qual apresenta-se conectada como representado na Figura 9.

Figura 9 – (a) Sistema Elétrico de Potência 5 barras / 5 linhas e (b) Dígrafo $G(\mathcal{N}, \mathcal{E})$ equivalente ao SEP com 4 nós e 4 ramos apresentando o fluxo de potência nos ramos.



Fonte: Autoria própria.

3 MÉTODO GRAFO-ALGÉBRICO PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO BASEADO NA FATORAÇÃO TRIANGULAR INFERIOR ORDENADA

Na presença de um distúrbio crítico - perda de sincronismo entre os geradores do SEP utiliza-se como última medida corretiva a separação física da rede em subsistemas de grupos de geradores coerentes (geradores síncronos) possibilitando o fornecimento da energia elétrica para as cargas (VITTAL; HEYDT, 2009).

Neste cenário crítico para o SEP, o projeto de ilhamento controlado propõe a separação física intencional da rede para preservar o equilíbrio e promover o menor desbalanço entre a geração de potência ativa do grupo de geradores coerentes e o consumo das cargas nos subsistemas evitando o colapso do SEP após a ocorrência do distúrbio (SOUZA, 2014).

Deste modo, neste capítulo é apresentado o método grafo-algébrico para o projeto de ilhamento controlado proposto por Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) baseado na fatoração triangular inferior ordenada da matriz incidência nó-ramo (H) capaz de encontrar conjuntos de ramos (equipamentos de transmissão) que quando desativados promovam a separação do SEP em dois subsistemas.

Nessa metodologia a fatoração triangular inferior ordenada da matriz incidência nó-ramo associada ao SEP promove a seleção de possíveis candidatos (conjuntos de corte) para a construção do projeto de ilhamento que são avaliados através da função de custo a fim de selecionar o melhor conjunto para promover a separação física do SEP em dois subsistemas de geradores coerentes.

3.1 Formulação do problema

Segundo Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) o problema da seleção dos conjuntos de ramos (elementos do SEP) que deverão ser desativados para a separação da rede pode ser modelado utilizando a teoria grafo-algébrica como um problema de otimização a fim de determinar o melhor conjunto de corte através de uma função custo (objetivo) a ser minimizada (ou maximizada).

A função de custo permite estabelecer os objetivos a serem alcançados durante a busca no grafo. Assim, Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) propõem a função de custo dado por:

$$J(\mathcal{C}(U, U')) = \sum_{\{l_k\} \in \mathcal{C}(U, U')} w_{l_k} \quad (5)$$

com $\mathcal{C}(U, U')$ representando o conjunto de equipamentos (conjunto de corte - ramos) que separa o conjunto de barras (nós) U e U' do SEP em ilhas distintas e w_{l_k} representa o custo (peso) da perda do equipamento de transmissão l_k que pode ser ajustado para encontrar o conjunto de corte $\mathcal{C}(U, U')$ com o menor número de equipamentos ($w_{l_k} = 1$) ou a solução que interrompa o menor fluxo total de potência ativa ($w_{l_k} = P_{l_k}$).

3.2 Método grafo-algébrico baseado na fatoração triangular inferior ordenada

Considere um grafo $G(\eta, \xi)$ associado à rede de energia elétrica nos quais os nós representam os barramentos do sistema e os ramos os equipamentos de interconexão deste sistema. A matriz incidência nó-ramo associada ao SEP de m barras (nós) e n linhas (ramos) é construída por (SOUZA, 2014; THEODORO *et al.*, 2014):

$$H_{m \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{linha 1} & \cdots & \text{linha } n \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{barra 1} \\ \vdots \\ \text{barra } m \end{matrix} & \left[\begin{matrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{matrix} \right]_{m \times n} \end{matrix} \quad (6)$$

sendo os elementos h_{ij} da matriz $H_{m \times n}$ definidos através das conexões entre os barramentos (nós) que compõem o SEP por (SOUZA, 2014; THEODORO *et al.*, 2014):

$$h_{ij} = \begin{cases} 1(-1), & \text{se o ramo "j" é conectado ao nó "i" no ponto inicial (final)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

com $i=1, \dots, m$ e $j=1, \dots, n$, sendo m e n respectivamente o número de barras (nós) e de linhas (ramos) que compõem o SEP. Observe que o grafo gerado apresenta uma pseudo-orientação dos ramos conectados aos barramentos i e j do SEP devido a escolha arbitrária dos barramentos como ponto inicial e ponto final.

Os grupos de geradores coerentes a serem separados devem ser posicionados na primeira e última linhas da matriz incidência nó-ramo e para a aplicação da metodologia considera-se um conjunto de ramos $C = \{l_1, l_2, \dots, l_k\} \subset \xi$ como um conjunto de corte ($C(U, U')$) do grafo $G(\eta, \xi)$ se tal conjunto representar uma combinação linear das linhas da matriz incidência nó-ramo ($H_{m \times n}$).

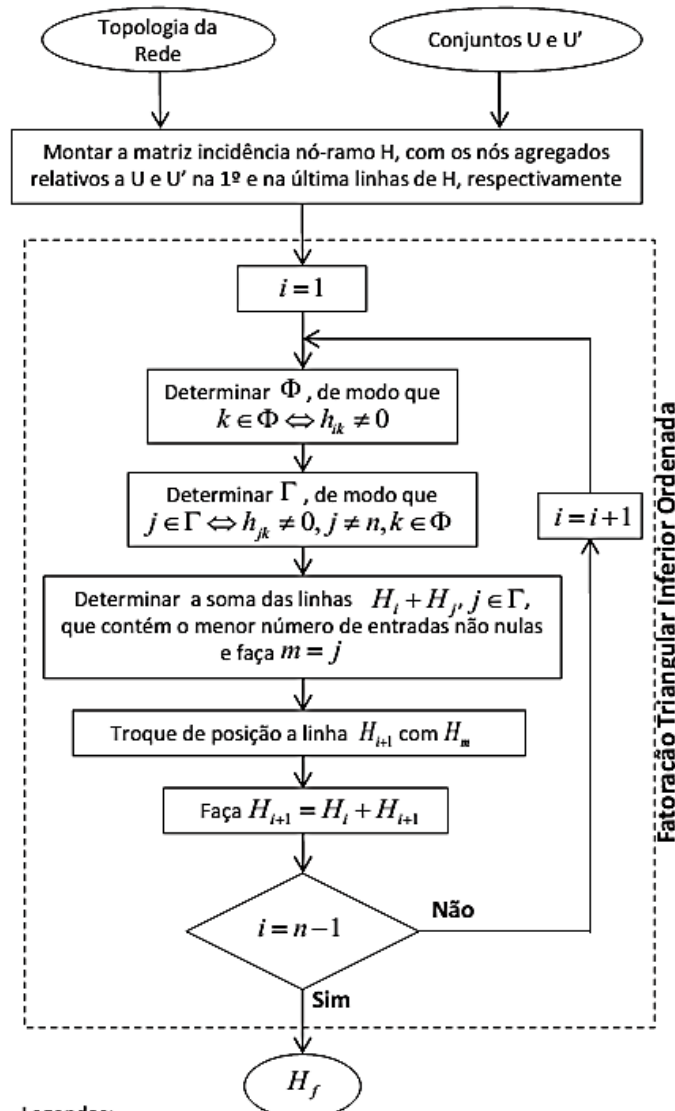
Assim, aplicando a fatoração triangular inferior ordenada na matriz incidência nó-ramo ($H_{m \times n}$) associada ao SEP, consideram-se os elementos não nulos de cada linha da matriz incidência nó-ramo fatorada (H_F) um conjunto de corte ($C(U, U')$) do grafo $G(\eta, \xi)$.

É importante destacar que o processo de fatoração não gera todos os conjuntos de corte possíveis pois é guiado para buscar conjuntos de corte mínimos locais de cada nó agregado gerando ao final da fatoração triangular inferior ordenada bons candidatos.

A permutação de linhas e colunas da matriz H antes da fatoração pode resultar em conjuntos de corte diferentes devido a troca de posição dos barramentos promovendo a formação de caminhos diferentes (Theodoro *et al.*, 2014).

O fluxograma da implementação do método grafo algébrico proposto por Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Fatoração Triangular Inferior Ordenada



Legendas:

H_i = linha i da matriz H

h_{ij} = elemento na linha i e coluna j da matriz H

Φ = conjunto das arestas conectados ao nó i

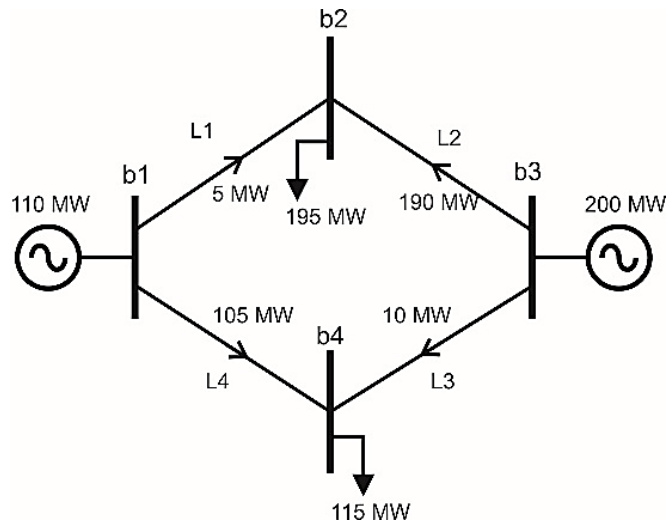
Γ = conjunto dos nós a conectados a aresta k

Fonte: Theodoro *et al.* (2014, pag. 5)

3.2.1 Aplicação do método grafo-algébrico baseado na fatoração triangular inferior ordenada

Para a aplicação dessa metodologia considere o SEP de 4 barras e 4 linhas representado na Figura 11.

Figura 11 - Sistema elétrico de potência com 4 barras e 4 linhas



Fonte: Adaptado de Theodoro *et al.* (2014, p. 5).

Para a elaboração do projeto de ilhamento controlado propõem-se a separação dos geradores conectados aos barramentos 1 e 3 que são posicionados na primeira e última linhas da matriz incidência nó-ramo.

A construção da matriz é realizada utilizando-se a pseudo-orientação dos ramos como apresentado na equação 7, por fim a matriz incidência nó-ramo do grafo associada ao SEP é dada por:

$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ \begin{matrix} b1 \\ b2 \\ b4 \\ b3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

Aplicando a fatoração triangular inferior ordenada a matriz H obtêm-se:

$$H_F = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ \begin{matrix} b1 \\ b1 + b2 \\ b1 + b2 + b4 \\ b1 + b2 + b4 + b3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

Se as colunas da matriz fatorada (H_F) forem permutadas é possível observar a fatoração triangular inferior da matriz H :

$$H_F = \begin{matrix} & & L1 & L4 & L2 & L3 \\ & b1 & & & & \\ & b1 + b2 & & & & \\ & b1 + b2 + b4 & & & & \\ b1 + b2 + b4 + b3 & & \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & & & \end{matrix} \quad (10)$$

Os elementos não nulos nas linhas da matriz H_F representam os conjuntos de corte e possíveis candidatos a solução do problema, portanto, os conjuntos de corte são: $C_1 = \{L1, L4\}$, $C_2 = \{L2, L4\}$ e $C_3 = \{L2, L3\}$.

As funções de custo em relação ao menor número de equipamentos desligados ($w_{l_k} = 1$) e em relação ao fluxo de potência interrompido ($w_{l_k} = P_{l_k}$) calculadas para os conjuntos de cortes são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado das funções de custo para os conjuntos de corte encontrados na fatoração da matriz incidência nó-ramo (H).

Conjunto de corte $(C_n(U, U'))$	Função de custo	
	$J(C_n(U, U'))(1)$	$J(C_n(U, U'))(P_{l_k})$
$C_1(U, U') = \{L1, L4\}$	2	110 MW
$C_2(U, U') = \{L2, L4\}$	2	295 MW
$C_3(U, U') = \{L2, L3\}$	2	200 MW

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o melhor conjunto de corte considerando a minimização da função de custo em relação ao fluxo de potência interrompido é o conjunto $C_1(U, U') = \{L1, L4\}$.

Agora, considerando novamente o SEP de 4 barras para a elaboração do projeto de ilhamento controlado, entretanto, permutando-se as linhas e as colunas da matriz incidência nó-ramo:

$$H^* = \begin{matrix} & & L4 & L3 & L1 & L2 \\ & b1 & & & & \\ & b4 & & & & \\ & b2 & & & & \\ & b3 & & & & \end{matrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

e aplicando a fatoração triangular inferior ordenada na matriz H obtêm-se:

$$H_F^* = \begin{matrix} & & & L4 & L3 & L1 & L2 \\ & & & -1 & 0 & 1 & 0 \\ & b1 & & 0 & -1 & 1 & 0 \\ & b1 + b4 & & 0 & -1 & 0 & 1 \\ & b1 + b4 + b2 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & b1 + b4 + b2 + b3 & & & & & \end{matrix} \quad (12)$$

e permutando-se as colunas de H_F verifica-se a fatoração triangular inferior da matriz.

$$H_F^* = \begin{matrix} & & & L4 & L1 & L3 & L2 \\ & & & -1 & 1 & 0 & 0 \\ & b1 & & 0 & 1 & -1 & 0 \\ & b1 + b4 & & 0 & 0 & -1 & 1 \\ & b1 + b4 + b2 & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & b1 + b4 + b2 + b3 & & & & & \end{matrix} \quad (13)$$

Os conjuntos de corte encontrados são: $C_1 = \{L1, L4\}$, $C_2 = \{L1, L3\}$ e $C_3 = \{L2, L3\}$.

Observa-se que permutação das linhas e colunas da matriz incidência nó-ramo antes da fatoração resultou em um novo candidato para a solução do problema: o conjunto de corte $C_2 = \{L1, L3\}$.

As funções de custo em relação ao menor número de equipamentos desligados ($w_{l_k} = 1$) e em relação ao fluxo de potência interrompido ($w_{l_k} = P_{l_k}$) calculadas para os conjuntos de cortes são apresentadas na Tabela 2.

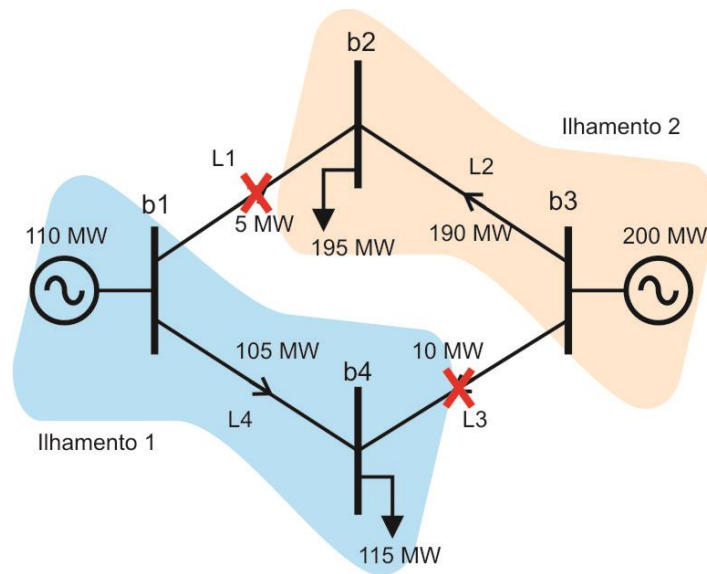
Tabela 2 – Resultado das funções de custo para os conjuntos de corte encontrados na fatoração da matriz incidência nó-ramo (H^*).

Conjunto de corte $(C_n(U, U'))$	Função de custo	
	$J(C_n(U, U'))(1)$	$J(C_n(U, U'))(P_{l_k})$
$C_1(U, U') = \{L1, L4\}$	2	110 MW
$C_2(U, U') = \{L1, L3\}$	2	15 MW
$C_3(U, U') = \{L2, L3\}$	2	200 MW

Fonte: Autoria própria.

O melhor conjunto de corte considerando a minimização da função de custo em relação ao fluxo de potência interrompido no SEP é o conjunto $C_2(U, U') = \{L1, L3\}$. Essa solução é a melhor possibilidade para a formação do ilhamento como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Proposta de ilhamento para o sistema elétrico de potência com 4 barras e 4 linhas.



Fonte: autoria própria.

A metodologia proposta por Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) apresenta rápida implementação e aplicação, a fatoração permite encontrar bons candidatos ao conjunto de corte. Entretanto, o melhor candidato pode não estar dentre os selecionados na fatoração sendo necessário a permutação dos conjuntos de linhas e colunas da matriz incidência nó-ramo associada ao SEP e a aplicação recorrente da fatoração para encontrá-lo como foi demonstrado no exemplo do SEP de 4 barras.

4 MÉTODO GRAFO-ALGÉBRICO PARA A ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO BASEADO NA FORMAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ILHAMENTO

O método proposto por Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) permite encontrar a cada fatoração da matriz incidência nó-ramo possíveis candidatos à solução do projeto deilhamento controlado. Os candidatos encontrados podem ou não representar a melhor solução para a elaboração do projeto sendo necessário, dependendo da topologia do SEP, aplicar a metodologia algumas vezes permutando linhas e/ou colunas da matriz para gerar novos candidatos, como foi demonstrado no exemplo da seção anterior para o projeto deilhamento controlado do SEP com 4 barras.

A enumeração e avaliação dos diversos candidatos à solução do problema pode elevar o custo computacional para a implementação dessa metodologia na busca do melhor candidato que representa o mínimo global da função custo do problema.

Assim, neste capítulo será apresentado um novo algoritmo que se baseia na fatoração triangular inferior ordenada da matriz incidência nó-ramo (H) visando a aplicação de uma busca em amplitude inteligente (*Breadth First Search* – BFS) na matriz incidência nó-ramo (H) a fim de superpor todas as soluções possíveis dos conjuntos de corte otimizando o processo de fatoração e reduzindo o esforço computacional para encontrar o melhor candidato.

Para realizar a *BFS* inteligente na matriz H constrói-se um domínio de ilhamento que é estabelecido através da avaliação da relação entre o grupo de geradores coerentes e cada barramento (nó) do SEP durante o processo de fatoração.

Para formação do domínio do ilhamento durante a fatoração é definido um valor limite de domínio (ε) para orientar a *BFS* na busca de barras (nós). Tal recurso possibilita à metodologia realizar uma superposição na busca dos ramos, avaliando todos os caminhos possíveis para a construção do conjunto de corte durante o processo de fatoração na formação do domínio.

No final do processo de fatoração da matriz incidência nó-ramo é apresentado o melhor candidato para o conjunto de corte considerando a interrupção do menor fluxo de potência entre as ilhas formadas (domínios).

4.1 Método grafo-algébrico baseado na formação de domínios de ilhamento

Considere o grafo dirigido (dígrafo) $G(\eta, \xi)$ associado à rede de energia elétrica através da matriz nó-ramo H com os nós do grafo representando os barramentos do SEP e os ramos representando os equipamentos de interconexão.

A orientação do dígrafo na construção da matriz incidência nó-ramo será em função do fluxo de potência ativa entre os barramentos definido através da seguinte regra (BRATIFICH; THEODORO, 2017):

$$h_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se o ramos } j \text{ não está conectado} \\ & \text{à barra } i \\ + |P_{L_j}|, & \text{se o fluxo de potência no ramo} \\ & j \text{ entra na barra } i \\ - |P_{L_j}|, & \text{se o fluxo de potência no ramo} \\ & j \text{ sai da barra } i \end{cases} \quad (14)$$

A potência total de entrada na barra i (P_{TI_i}) é definida por (BRATIFICH; THEODORO, 2017):

$$P_{TI_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ h_{ij}>0}}^n h_{ij} \quad (15)$$

com h_{ij} representando os ramos (linhas) presentes no nó i (barra).

A formação do domínio de ilhamento associado ao conjunto de nós (barras/equipamentos) pode ser estabelecida através da formulação da função de contribuição do ramo j para com nó (barra) i que relaciona o fluxo de potência transportado pelo ramo j (P_{L_j}) para com a potência total de entrada (P_{TI_i}) na barra i .

A função de contribuição é definida por (BRATIFICH; THEODORO, 2017):

$$C_{ij} = \frac{|h_{ij}|}{P_{TI_i}} \quad (16)$$

A função contribuição (C_{ij}) permite a formação do domínio de nós que satisfaça uma condição limite (ε) relacionada ao desbalanço de potência entre a carga e a geração na ilha.

O valor limite (ε) possibilita a avaliação do nó i através da função contribuição. De modo que a relação do ramo j , conectado a uma barra k pertencente ao domínio, para com o nó i avaliado define se este nó pertence ($C_{ij} \geq \varepsilon$) ou não ($C_{ij} < \varepsilon$) ao domínio em formação.

A formação do domínio (em última análise dos nós agregados) permite construir um conjunto de corte para o problema de ilhamento controlado. O melhor candidato, conjunto de corte que minimiza a função de custo, para o ilhamento controlado é consequência da determinação e otimização do valor limite (ε) que deve ser determinado para cada grafo (SEP) a fim de estabelecer-se o equilíbrio entre a produção de energia (ou capacidade) dos geradores e o consumo das cargas presentes no domínio.

Inicialmente, pode-se estimar esse parâmetro como a contribuição da potência ativa do grupo de geradores coerentes analisado em função da potência total dos grupos de geradores coerentes presentes no SEP definido por:

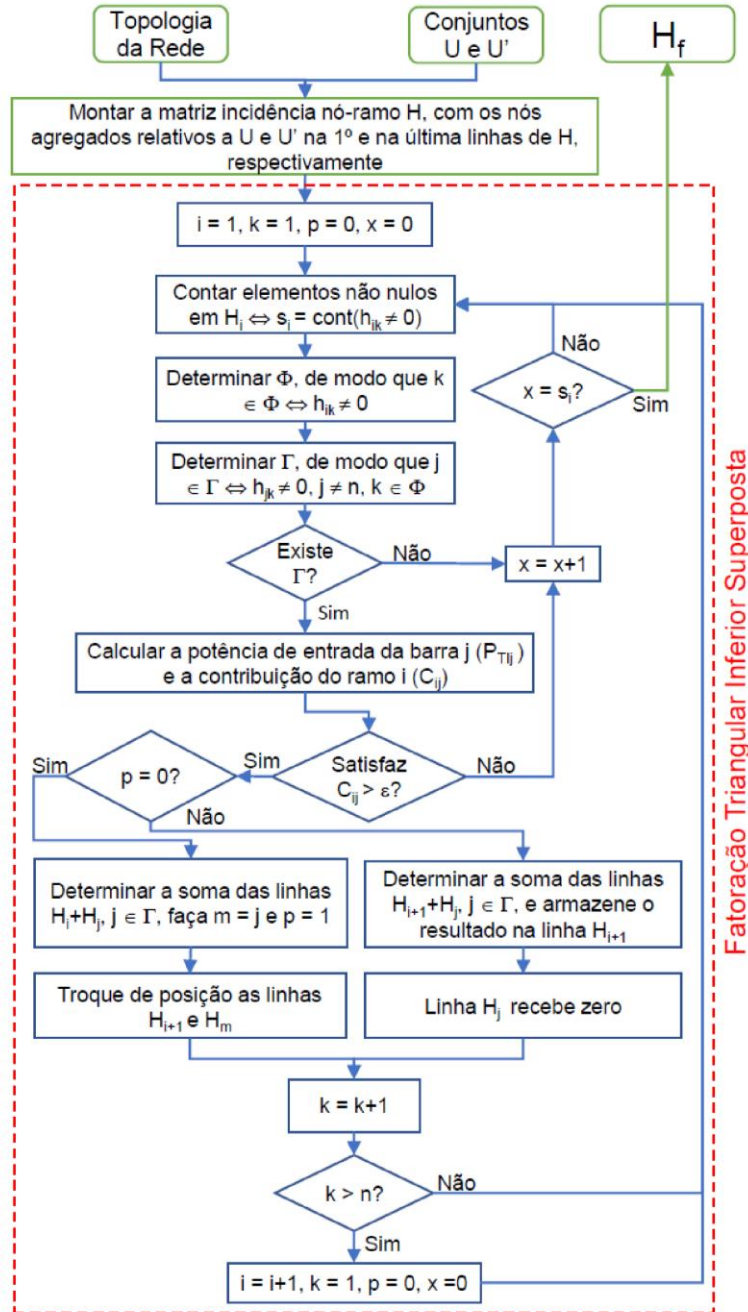
$$\varepsilon = \frac{G_U}{G_U + G_{U'}} \quad (17)$$

com G_U e $G_{U'}$ representando a potência ativa total dos grupos de gerados coerentes a serem separados no projeto do ilhamento.

Nessa metodologia os nós pertencentes ao domínio são selecionados através da função contribuição associada a busca em amplitude (*Breadth First Search* – *BFS*). Esses nós serão fatorados através da fatoração triangular inferior, porém, os resultados da fatoração serão superpostos, ou seja, todos os ramos que pertencente à nós do domínio serão avaliado e os nós fatorados serão aglutinados otimizando o processo de solução e reduzindo o esforço computacional evitando-se o processo de explosão combinatorial presente em alguns algoritmos de busca empregados na teoria grafo-algébrica (BRATIFICH; THEODORO, 2017).

O fluxograma da implementação do método grafo-algébrico proposto é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Fatoração Triangular Inferior Superposta



Fatoração Triangular Inferior Superposta

- Legendas:
- x = Critério de divergência;
 - p = Critério de superposição da fatoração;
 - s_i = Número de total de elementos não nulos na linha i da matriz H;
 - H_i = Linha i da matriz H;
 - h_{jk} = Elemento da linha j e coluna k da matriz H;
 - Φ = Conjunto das arestas conectados ao nó i;
 - Γ = Conjunto dos nós conectados à aresta k;
 - P_{Tij} = Potência total de entrada na linha j;
 - C_{ij} = Contribuição do elemento h_{jk} em relação a potência de entrada (P_{Tij}) na linha j;

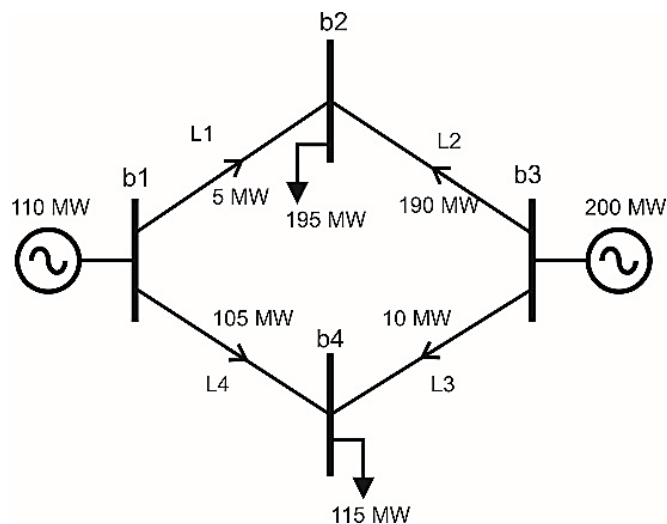
Fonte: Bratifich (2017, pag. 347)

4.1.1 Exemplo de aplicação da metodologia

Na fatoração triangular inferior superposta todas barras candidatas estão conectadas através dos ramos pertencente às barras do domínio.

As barras candidatas são localizadas através dos ramos e avaliados mediante a função contribuição e o valor limite (ε) para compor ou não o domínio de ilhamento em formação como será apresentado no exemplo do SEP de 4 barras e 4 linhas representado na Figura 14.

Figura 14 - Sistema elétrico de potência com 4 barras e 4 linhas



Fonte: Adaptado de Theodoro et. al (2014, p. 5).

Para a elaboração do projeto de ilhamento controlado propõem-se a separação dos geradores conectados aos barramentos 1 e 3 adotando-se o valor limite do domínio de $\varepsilon = 0,35$ determinado a partir da equação 17 para o gerador presente na barra 1.

Os elementos da matriz incidência nó-ramo são construídos a partir do sentido do fluxo de potência entre os barramentos, como apresentado na equação 14, e os geradores a serem separados são posicionados na primeira e última linhas da matriz. Dessa forma, a matriz incidência nó-ramo para este SEP é dada por:

$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b1 & [-5 & 0 & 0 & -105] \\ b2 & [5 & 190 & 0 & 0 \\ b4 & [0 & 0 & 10 & 105 \\ b3 & [0 & -190 & -10 & 0 \end{matrix} \quad (18)$$

O *BFS* inicia sua busca por elementos não nulos ($h_{ij} \neq 0$) na primeira linha da matriz ($b1$) e ao encontrar o primeiro elemento $h_{11} = -5$ verifica a qual nó (barra) esse elemento está conectado através do ramo $L1$.

Encontrado o barramento de destino, barra 2 ($b2$), calcula-se a potência total de entrada na barra de destino (P_{TI_2}) dada por:

$$P_{TI_2} = \sum_{\substack{j=1 \\ h_{ij}>0}}^4 h_{2j} = h_{21} + h_{22} = 5 + 190 = 195 \quad (19)$$

e calcula-se a contribuição do ramo ($L1$) para com o nó - barra 2 ($b2$):

$$C_{12} = \frac{|h_{11}|}{P_{TI_2}} = \frac{|-5|}{195} \cong 0,03 \quad (20)$$

o valor calculado na função contribuição é inferior ao valor limite ($C_{12} < \varepsilon$), portanto a barra 2 ($b2$) não pertence ao domínio formado pela barra 1 ($b1$).

O *BFS* continua avaliando os elementos da barra 1 ($b1$) em busca de outro elemento não-nulo e encontra o elemento $h_{14} = -105$ e verifica a qual nó (barra) esse elemento está conectado através do ramo $L4$.

Encontrando o barramento de destino, barra 4 ($b4$) que na matriz incidência nó-ramo está posicionado na linha 3, é calculado a potência total de entrada na barra (P_{TI_3}) dada por:

$$P_{TI_3} = \sum_{\substack{j=1 \\ h_{ij}>0}}^4 h_{3j} = h_{33} + h_{34} = 10 + 105 = 115 \quad (21)$$

e calcula-se a contribuição do ramo ($L4$) para com a barra 4 ($b4$):

$$C_{43} = \frac{|h_{14}|}{P_{TI_3}} = \frac{|-105|}{115} \cong 0,91 \quad (22)$$

o valor da função contribuição é superior ao valor limite ($C_{43} \geq \varepsilon$), portanto, a barra 4 (b_4) pertence ao domínio formado pela barra 1 (b_1) e aplica-se a fatoração triangular inferior as barras 1 e 4 gerando um nó aglutinado ($b_1 + b_4$) produto dessas duas barras.

Após a fatoração elimina-se da matriz a linha da barra 4 (b_4) e o nó aglutinado ($b_1 + b_4$) é adicionado à matriz abaixo da primeira linha.

$$H_F = \begin{matrix} & & L1 & L2 & L3 & L4 \\ \begin{matrix} b1 \\ b1 + b4 \\ b2 \\ b3 \end{matrix} & & \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 & -105 \\ -5 & 0 & 10 & 0 \\ 5 & 190 & 0 & 0 \\ 0 & -190 & -10 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (23)$$

Após avaliar todos os elementos na primeira linha a *BFS* inicia sua busca no nó aglutinado ($b_1 + b_4$) e encontra o elemento $h_{21} = -5$ proveniente da barra 1 (b_1) e realiza o processo avaliação para com a barra 2 (b_2), entretanto, essa barra não pertence ao domínio formado pela barra 1 sendo descartada novamente.

Após a avaliação do elemento h_{21} , o processo de busca continua nos elementos do nó aglutinado e encontra o elemento h_{23} , entretanto, esse elemento está conectado ao barramento do outro domínio (b_3) através do ramo ($L3$) e, portanto, esse elemento não é avaliado por ser um elemento pertencente a outro domínio.

Como todos ramos presentes ($L1$ e $L3$) no nó aglutinado ($b_1 + b_4$) que compõem a fronteira do domínio não aglutinaram mais nenhuma barra para compô-lo o processo de busca é finalizado e a matriz fatorada encontrada é:

$$H_F = \begin{matrix} & & L1 & L2 & L3 & L4 \\ \begin{matrix} b1 \\ b1 + b4 \end{matrix} & & \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 & -105 \\ -5 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (24)$$

Os elementos não nulos da última linha fatorada da matriz H_F representam o conjunto de corte candidato a solução do problema $C(U, U') = \{L1, L3\}$.

Caso encontre-se mais de um nó (barra) pertencente ao domínio em formação durante a *BFS* de um nó, a fatoração triangular inferior realizada deverá apresentar resultados superpostos. O processo de superposição consiste em:

- (i) se é a primeira fatoração a ser realizada no nó do domínio gera-se um novo nó agregador posicionado abaixo da primeira linha quando o processo é proveniente da primeira linha da matriz ou abaixo da linha do nó aglutinado que o gerou.

- (ii) se há um nó-aglutinado produto da primeira fatoração, as demais fatoraões devem ser aglutinadas a esse nó e o produto final das operações deve ser posicionado abaixo da primeira linha quando o processo é proveniente da primeira linha ou abaixo da linha do nó aglutinado que o gerou.

- (iii) Todas as barras aglutinadas durante o processo de fatoração são descartadas da matriz incidência nó-ramo exceto a barra do grupo de geradores coerentes (linha 1 ou barra 1).

Para melhor compreensão do processo considere o exemplo da matriz incidência nó-ramo genérica dada por:

$$H_F = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 \\ b1 & [-a & -b & 0 & 0 & 0 \\ b2 & [a & 0 & -c & 0 & 0 \\ b3 & [0 & b & 0 & 0 & 0 \\ b4 & [0 & 0 & 0 & 0 & e \\ b5 & [0 & 0 & c & d & 0 \\ b6 & [0 & 0 & 0 & -d & -e \end{matrix} \quad (25)$$

Supondo que as barras 1, 2, 3 e 5 pertencem ao mesmo domínio, portanto $C_{ij} \geq \varepsilon$. Aplicando a fatoração triangular inferior superposta obtêm-se:

$$H_F = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 \\ b1 & [-a & -b & 0 & 0 & 0 \\ b1 + b2 + b3 = g & [0 & 0 & -c & 0 & 0 \\ g + b5 & [0 & 0 & 0 & d & 0 \\ b4 & [0 & 0 & 0 & 0 & e \\ b6 & [0 & 0 & 0 & -d & -e \end{matrix} \quad (26)$$

No processo de superposição das barras, a barra 1 ($b1$) é aglutinada as barras $b2$ e $b3$ através da fatoração, inicialmente, fatorando $b1$ e $b2$ gerando o nó agregador ($b1 + b2$) e após é aglutinado a esse nó a barra 3 ($b3$) formando o nó

aglutinado ($b1 + b2 + b3$). Observe que devido a barra 3 ($b3$) ser a segunda fatoração na barra 1 ($b1$) não é gerado um novo nó agregador.

Após a avaliação de todos os ramos na barra 1 e a geração do nó-aglutinado ($b1 + b2 + b3$) que é posicionado abaixo da primeira linha da matriz, o processo de *BFS* inicia a pesquisa e avaliação dos ramos nesse nó e encontra o elemento h_{23} e promove a fatoração do nó aglutinado ($b1 + b2 + b3$) com a barra 5 ($b5$) gerando um novo nó ($b1 + b2 + b3 + b5$) devido essa fatoração ser a primeira naquele nó.

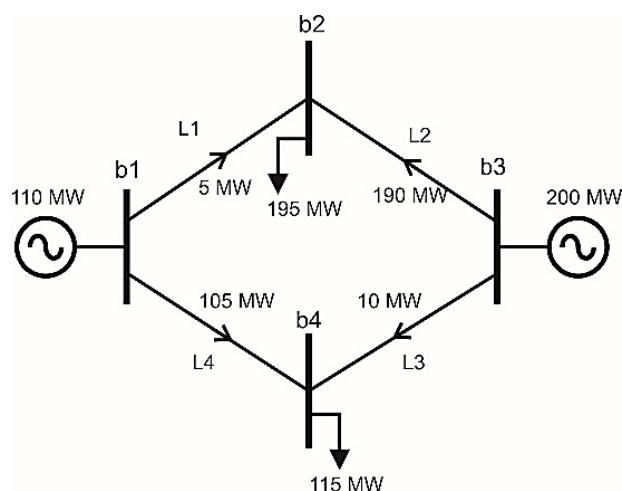
Após a pesquisa de todos os ramos do nó-agregador ($b1 + b2 + b3$), o resultado da fatoração é posicionado na linha abaixo do nó e o processo de *BFS* inicia sua pesquisa no novo nó-agregador ($b1 + b2 + b3 + b5$).

Como o único ramo do nó (h_{34}) está conectado ao outro domínio o processo de busca é finalizado. Dessa forma, o conjunto de corte encontrado é $C(U, U') = \{L4\}$.

4.1.2 Aplicação do método grafo-algébrico baseado na formação de domínios de ilhamento

Para melhor compreensão do método e do efeito de superposição dos conjuntos de corte para a seleção do melhor candidato considere, novamente, o SEP de 4 barras e 4 linhas analisado anteriormente representado na Figura 15.

Figura 15 - Sistema elétrico de potência com 4 barras e 4 linhas



Fonte: Adaptado de Theodoro et. al (2014, p. 5).

Na avaliação anterior encontrou-se como melhor candidato o conjunto de corte $C(U, U') = \{L1, L3\}$.

Propondo-se, novamente, a separação dos geradores conectados aos barramentos 1 e 3 para a elaboração do projeto de ilhamento controlado, entretanto adotando-se como barra de partida para formação do domínio o gerador conectado à barra 3. De modo que o novo valor limite de domínio é $\varepsilon = 0,65$ determinado a partir da equação 17 para o gerador presente na barra 3.

Constrói-se a matriz incidência nó-ramo (H) seguindo o sentido do fluxo de potência entre as barras conforme equação 14 e permutam-se as barras dos grupos de geradores coerentes iniciando o processo na barra 3 ($b3$) em contrapartida à fatoração aplicada anteriormente iniciada na barra 1 ($b1$).

Assim, a matriz incidência nó-ramo a ser fatorada para demonstrar a superposição da solução na qual são permutados os geradores é:

$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b3 & \left[\begin{array}{cccc} 0 & -190 & -10 & 0 \\ 5 & 190 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 105 \\ -5 & 0 & 0 & -105 \end{array} \right] \\ b2 & \\ b4 & \\ b1 & \end{matrix} \quad (27)$$

Aplicando a fatoração triangular inferior superposta obtêm-se:

$$H_F = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b3 & \left[\begin{array}{cccc} 0 & -190 & -10 & 0 \\ 5 & 0 & -10 & 0 \end{array} \right] \\ b3 + b2 & \end{matrix} \quad (28)$$

Os elementos não nulos da última linha da matriz H_F que compõem o conjunto de corte candidato a solução do problema, $C_1(U, U') = \{L1, L3\}$, são a solução encontrada anteriormente quando o processo foi iniciado a partir da barra 1 ($b1$) demonstrando o efeito da superposição que direciona a busca a encontrar o melhor candidato independente do conjunto de geradores coerentes adotado como partida.

É importante destacar que tal permutação caso aplicada no método proposto por Souza (2014) e Theodoro *et al.* (2014) promoveria a formação de novos candidatos à conjuntos de corte, entretanto, a superposição e formação do

domínio direcionando a *BFS* promovem a convergência dos conjuntos de corte ao candidato encontrado anteriormente.

As funções de custo em relação ao menor número de equipamentos desligados ($w_{l_k} = 1$) e em relação ao fluxo de potência interrompido ($w_{l_k} = P_{l_k}$) calculadas para o conjunto de corte são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado das funções de custo para o conjunto de corte encontrado na fatoração da matriz incidência nó-ramo (H).

Conjunto de corte	Função de custo	
	$(C_n(U, U'))$	$J(C_n(U, U'))(1)$ $J(C_n(U, U'))(P_{l_k})$
$C_1(U, U')$	2	15 MW

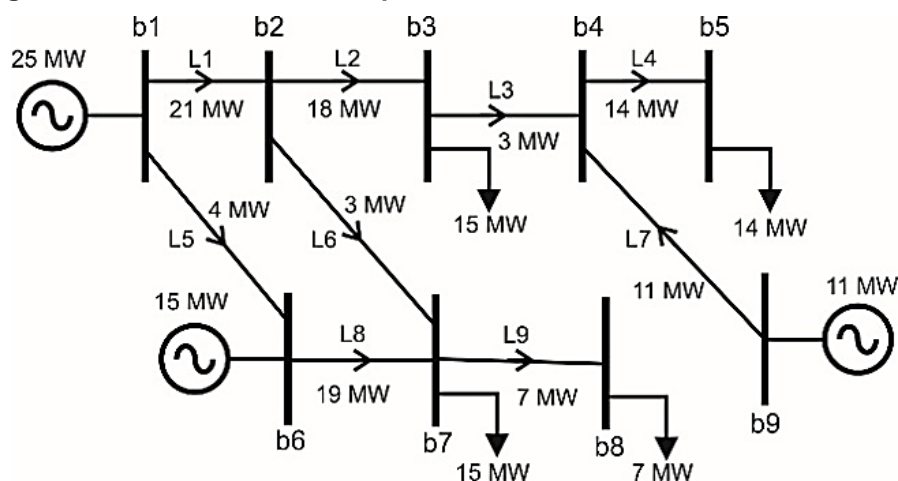
Fonte: Autoria própria.

O conjunto de corte encontrado minimiza a função de custo e para o SEP analisado representa o mínimo global do problema, ou seja, o melhor conjunto de corte a ser adotado.

No exemplo de 4 barras e 4 linhas a metodologia apresentada encontrou o melhor conjunto de corte para o SEP analisado, entretanto, tal heurística é dependente do melhor ajuste do parâmetro do valor limite do domínio (ϵ) que se ajustado incorretamente pode produzir respostas não desejadas em relação ao conjunto de corte como será demonstrado no exemplo do SEP de 9 barra.

Considere o SEP composto por 3 geradores, 9 barras e 9 linhas de transmissão representado na Figura 16.

Figura 16 – Sistema elétrico de potência com 9 barras e 9 linhas.



Fonte: Bratfich (2017, p. 349)

A matriz incidência nó-ramo (H), para esse exemplo, é construída seguindo o sentido do fluxo de potência entre as barras conforme equação 14. Assim, a matriz incidência nó-ramo (H) para esse SEP é dada por:

$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 & L8 & L9 \\ \begin{matrix} b1 \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b5 \\ b6 \\ b7 \\ b8 \\ b9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -21 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 21 & -18 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 18 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & -14 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & -19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 19 & -7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -11 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (29)$$

Para a formação do ilhamento os grupos de geradores devem ser separados através do estudo de coerência entre as máquinas do SEP em um processo preliminar à aplicação do algoritmo proposto.

Nesse SEP com três geradores serão considerados coerentes os geradores conectados aos barramentos 1 e 6, que serão separados do gerador conectado ao barramento 9 para otimizar a aplicação da metodologia.

O grupo de geradores coerentes é formado a partir de um barramento (nó) agregado equivalente produzido pela aglutinação dos barramentos 1 e 6 ($G = b1+b6$). Para a formação do nó agregado equivalente somente os geradores selecionados serão aglutinados ao nó e todas as barras intermediárias conectadas a esses elementos permanecerão no grafo. Essas barras serão avaliadas através da função contribuição durante a formação do domínio (ilhamento) e serão aglutinadas naturalmente ao grupo de geradores.

A matriz incidência nó-ramo com o nó agregado equivalente do grupo de geradores coerentes é representada por:

$$\tilde{H} = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 & L8 & L9 \\ \begin{matrix} b1 + b6 \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b5 \\ b7 \\ b8 \\ b9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -19 & 0 \\ 21 & -18 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 18 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & -14 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 19 & -7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -11 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (30)$$

Para demonstrar a dependência da metodologia com o ajuste do valor limite do domínio (ε) adotou-se o valor limite de $\varepsilon = 0,87$ e aplicando o processo de fatoração triangular inferior superposto obtém-se:

$$\widetilde{H}_F = \begin{matrix} b1 + b6 = G \\ G + b2 = F \\ F + b3 \end{matrix} \begin{matrix} L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 & L8 & L9 \\ \left[\begin{array}{cccccccccc} -21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -19 & 0 \\ 0 & -18 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & -19 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & -3 & 0 & -19 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (31)$$

O conjunto de corte obtido é $C(U, U') = \{L3, L6 e L8\}$, porém, esse conjunto não promove o menor desbalanço da relação geração-carga nas ilhas, como demonstra-se ineficaz ao produzir a formação de uma ilha sem geração (barras 7 e 8). Entretanto, é possível observar a partir da Figura 16 que o melhor conjunto de corte (ramos) é composto apenas pela linha L3 do SEP.

Assim adotando-se o valor limite do domínio em $\varepsilon = 0,78$ calculado a partir da equação 17 para o grupo de geradores coerentes G e aplicando o processo de fatoração triangular inferior superposto obtém-se:

$$\widetilde{H}_F = \begin{matrix} b1 + b6 = G \\ G + b2 + b7 = F \\ F + b3 + b8 \end{matrix} \begin{matrix} L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 & L8 & L9 \\ \left[\begin{array}{cccccccccc} -21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -19 & 0 \\ 0 & -18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (32)$$

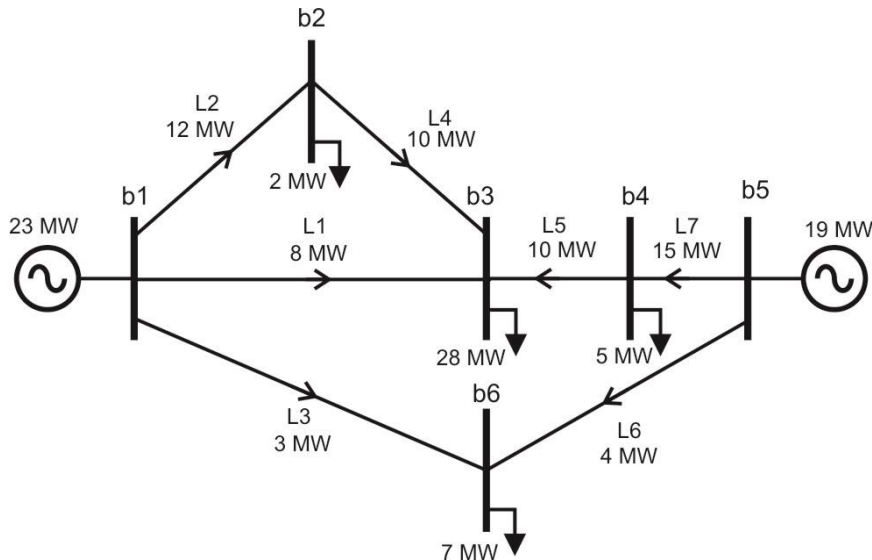
O conjunto de corte obtido é $C(U, U') = \{L3\}$ e representa o menor fluxo de potência interrompido (3 MW). Demonstrando a dependência da metodologia com a otimização do valor de limite de domínio (ε) para a obtenção do melhor conjunto de corte.

É importante destacar que o valor limite do domínio (ε) calculado através da equação 17 em relação aos grupos de geradores coerentes a serem separados tem se demonstrado eficaz para os SEP de pequeno porte e baixa complexidade. A medida que o porte e complexidade do sistema aumentam será necessário atualizar este valor à medida que os nós de carga são agregados ao domínio e a complexidade das interconexões na fronteira deste domínio aumenta.

A exemplo disso, é possível verificar que para um sistema de pequeno porte a variação do valor limite do domínio (ε) é incapaz de gerar o melhor conjunto de corte como é apresentado no exemplo de 6 barras a seguir.

Considere o SEP composto por 2 geradores, 6 barras e 7 linhas de transmissão representado na Figura 17.

Figura 17 - Sistema elétrico de potência com 6 barras e 7 linhas.



Fonte: Autoria própria.

Propõem-se a separação dos geradores conectados aos barramentos 1 e 5 para a elaboração do projeto de ilhamento controlado e adota-se o valor limite de domínio em $\varepsilon = 0,56$ determinado a partir da equação 17 para o gerador presente na barra 1.

A matriz incidência nó-ramo (H) é construída seguindo o sentido do fluxo de potência entre as barras conforme equação 14. Assim, a matriz incidência nó-ramo (H) a ser fatorada para o SEP apresentado é:

$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 \\ \begin{matrix} b1 \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b6 \\ b5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -8 & -12 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 10 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & -15 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (33)$$

Aplicando o processo de fatoração triangular inferior superposto obtém-se:

$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 \\ \begin{matrix} b1 \\ b1 + b2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -8 & -12 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & 0 & -3 & -10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (34)$$

O conjunto de corte obtido é $C(U, U') = \{L1, L3 \text{ e } L4\}$ que irá interromper um fluxo de potência de 21 MW entre as ilhas formadas e sobrecarregará o gerador presente na barra 5 de 19 MW, porém, esse conjunto de corte não representa o menor fluxo de potência interrompido como é possível observar a partir da Figura 17 na qual o melhor conjunto de corte (ramos) são as linha $L3$ e $L5$ do SEP interrompendo um fluxo de potência de 13 MW entre as ilhas e equilibrando a relação geração-carga.

Verificou-se que com o valor calculado através da equação 17 não é possível encontrar o melhor conjunto de corte, então variou-se o valor limite (ε) na tentativa de otimizá-lo e encontrar o melhor conjunto de corte para o SEP. Os ajustes utilizados no valor limite (ε), os conjuntos de corte ($C(U, U')$) e o fluxo de potência interrompido entre as ilhas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valor limite (ε), conjuntos de corte encontrados ($C(U, U')$) e o fluxo de potência interrompido entre as ilhas (ΔP).

Valor limite	Cunto de corte	Fluxo interrompido
ε	$C_n(U, U')$	ΔP
0,45	{L1, L3, L4}	31 MW
0,50	{L1, L3, L4}	31 MW
0,56	{L1, L3, L4}	31 MW
0,60	{L1, L3, L4}	31 MW
0,65	{L1, L3, L4}	31 MW
0,70	{L1, L3, L4}	31 MW
0,75	{L1, L3, L4}	31 MW
0,80	{L1, L3, L4}	31 MW

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que somente a variação do valor limite (ε) não é suficiente para encontrar o melhor conjunto de corte para o SEP. Desse modo, é necessário realizar uma atualização de seu valor iterativamente junto a formação do domínio de ilhamento.

Outra possibilidade a ser utilizada é o emprego de uma metaheurística, por exemplo algoritmo genético, para guiar o processo de fatoração sem a necessidade da otimização do valor limite de domínio.

5 ALGORITMO GENÉTICO APLICADO A ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ILHAMENTO CONTROLADO

A superposição das soluções durante o processo de fatoração do método grafo-algébrico baseado no domínio doilhamento para a elaboração de projeto de ilhamento controlado permite a rápida convergência do conjunto de corte para o melhor candidato reduzindo o esforço computacional e evitando a explosão combinatorial ao realizar uma busca inteligente.

Todavia, a metodologia proposta tem sua eficácia dependente da seleção do valor limite de domínio (ε) o que pode se tornar um segundo problema de otimização, pois este valor deve ser ajustado iterativamente para SEPs maiores e mais complexos ao longo do processo de formação das ilhas a fim de estabelecer uma relação de equilíbrio entre os geradores e as cargas do domínio a ser formado.

Diante do exposto, problemas de otimização semelhantes ao apresentado neste trabalho vêm sendo solucionados com grande eficiência, principalmente na área de sistemas de energia elétrica (CARVALHO, 2015), através da utilização de algoritmos genéticos (LIN *et al.*, 2000) e de métodos bio-inspirados (CHANG; KUO, 1994; CHANG, 2008; SEDIGHIZADEH *et al.*, 2014).

Assim, neste capítulo será apresentada a aplicação de um algoritmo genético (AG), cuja função de avaliação será baseada no método grafo-algébrico proposto por Bratfich e Theodoro (2017), para a solução do problema de ilhamento controlado em SEPs.

5.1 Algoritmo Genético (AG)

O algoritmo genético (AG) surgiu na década de 1960 criado pelo físico e matemático estadunidense John Henry Holland que propôs um modelo heurístico computacional baseado em seus estudos da teoria de evolução das espécies de Charles Darwin e em alguns conceitos de genética e reprodução celular para resolver problemas de alta complexidade (LINDEN, 2006).

A teoria de evolução das espécies de Charles Darwin propõe que os indivíduos de uma espécie mais adaptados ao ambiente apresentam maior probabilidade de sobreviver e gerar descendentes passando suas características (genes) as próximas gerações e seus descendentes podem apresentar melhor

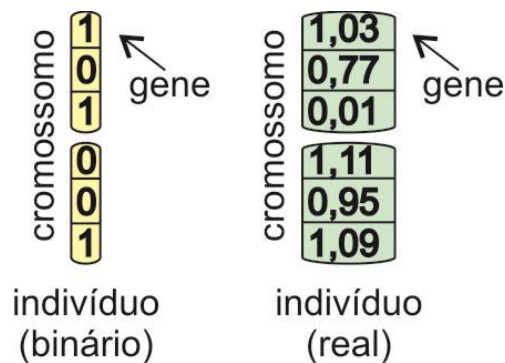
adaptação ao ambiente que seus progenitores devido à combinação das características positivas presentes em seus ancestrais (LINDEN, 2006).

Desse modo, Holland elaborou uma metaheurística na qual as possíveis soluções para um problema são associadas a indivíduos de uma população que são expostos num ambiente no qual os mecanismos evolutivos selecionarão naturalmente os mais adaptados.

Os indivíduos sobreviventes de cada geração produzirão descendentes transmitindo suas características (genes) e, assim, aproximando o AG da solução ótima do problema com a evolução das gerações.

No AG, a população inicial de indivíduos, gerada aleatoriamente, representa um conjunto de soluções possíveis para o problema abordado. O indivíduo (solução potencial) é formado por um cromossomo composto por genes que representam as características particulares do indivíduo e podem assumir valores binários ou reais como apresentado no exemplo da Figura 18.

Figura 18 – Representação do cromossomo binário e real com 6 genes.



Fonte: Autoria própria.

A cada geração a carga genética dos indivíduos é avaliada em relação a qualidade da possível solução que produz para o problema através de uma função de avaliação (aptidão) ou função *fitness*.

Os indivíduos classificados quanto a sua qualidade de carga genética são submetidos a um processo seleção que tenta simular o mecanismo de seleção natural.

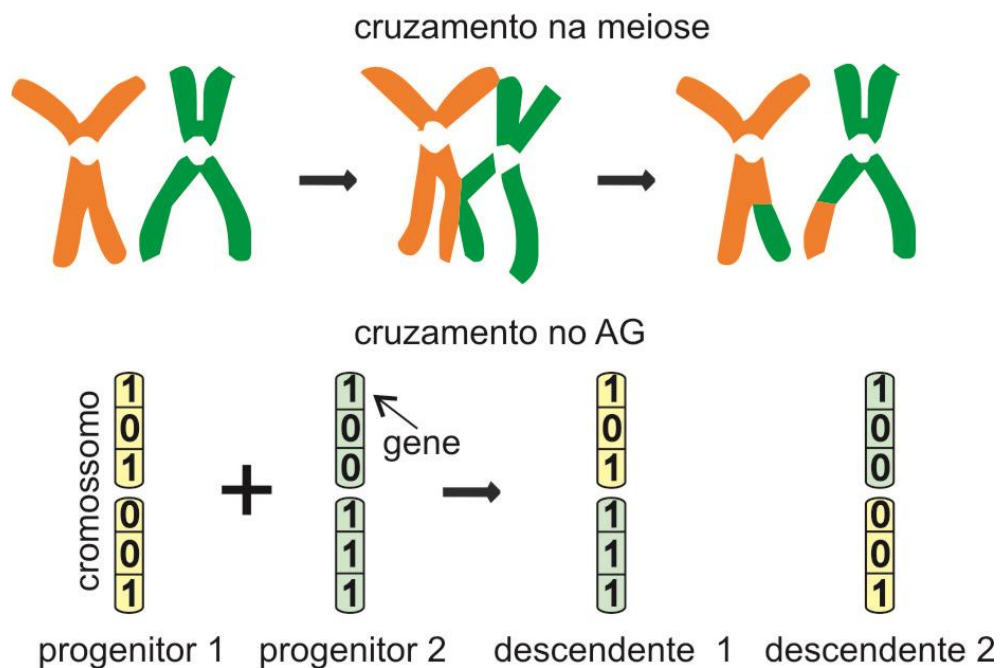
Na seleção, os indivíduos avaliados com melhor carga genética (qualidade de solução) são selecionados para compor a base genética da próxima

geração e passarão por operadores genéticos de cruzamento e mutação que têm a função de simulam fenômenos vistos na natureza como reprodução sexuada e mutação genética (LINDEN, 2006).

O operador genético de cruzamento é baseado na meiose celular na qual os cromossomos durante o processo de divisão celular se interceptam em algum ponto de sua estrutura e trocam genes aumentando a variabilidade genética dos cromossomos descendentes como apresentado na Figura 19.

No AG, o cruzamento é aplicado aos indivíduos que compõem a base genética para inserir na população descendentes que apresentem um potencial maior que seus progenitores e aumentar a variabilidade genética na população.

Figura 19 – Representação da permutação de informação genética entre cromossomos durante o processo de meiose e no cromossomo do AG.



Fonte: Autoria própria.

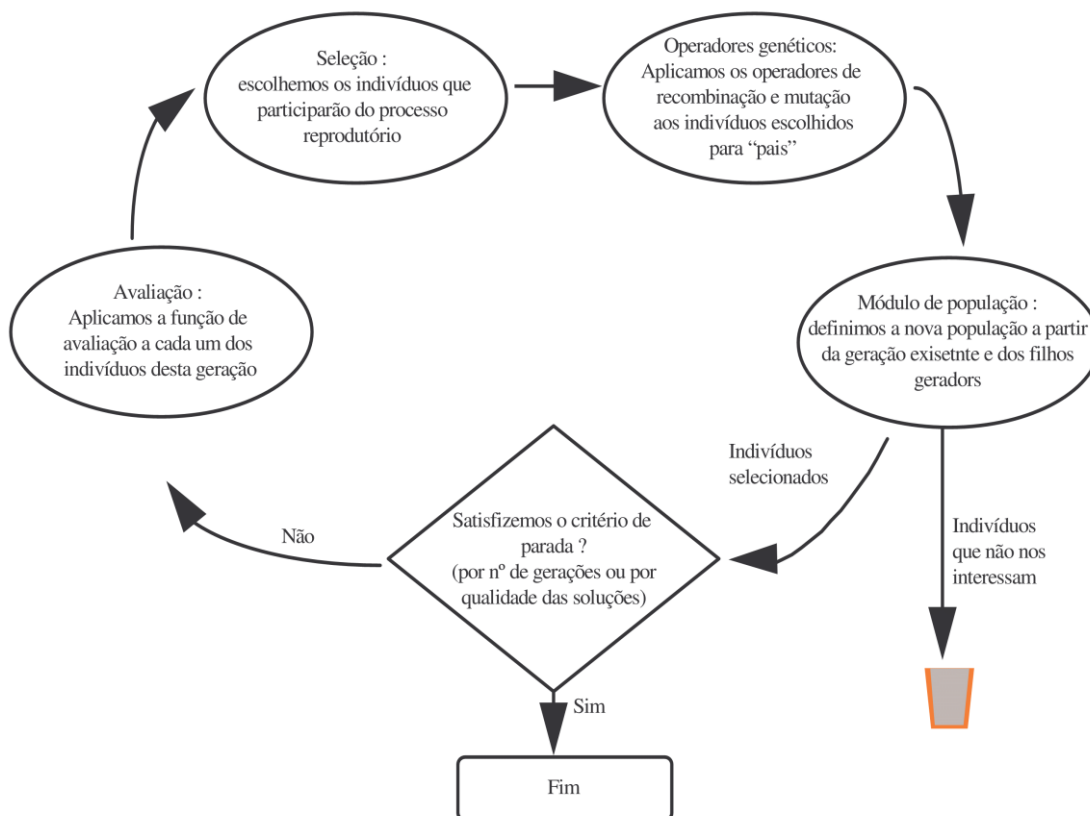
Enquanto o operador genético de mutação promove mudanças aleatórias nos valores dos genes em alguma posição do cromossomo. O indivíduo mutante permite ao AG explorar novos espaços de busca nas soluções do problema devido a inserção da perturbação (gene mutante) haja vista que o processo de avaliação e seleção tendem a concentrar a carga genética em torno de uma possível vizinhança próxima da melhor solução encontrada para o problema durante a aplicação do AG.

É importante ressaltar que a inserção da mutação deve ocorrer em uma pequena parcela de indivíduos da população para evitar a formação de um conjunto solução aleatório que não apresente convergência para a possível solução do problema abordado (LINDEN, 2006).

Os processos de avaliação, seleção e os operadores genéticos de cruzamento e mutação aplicados aos indivíduos da população, têm por objetivo simular a sobrevivência do mais capaz e com isso podem encontrar o conjunto de indivíduos que mais se aproximem da solução ótima do problema, entretanto, nem sempre os melhores indivíduos presentes no conjunto encontrado representarão a solução ótima do problema.

Um esquema básico para a aplicação do AG é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Esquema básico do algoritmo genético



Fonte: Linden (2006, p. 27)

O processo básico de aplicação do AG consiste em gerar uma população inicial, avaliar seus membros, selecioná-los e descartar os indivíduos incapazes, aplicar os operadores genéticos aos membros selecionados gerando uma nova população descartar os pais e filhos que serão avaliados e selecionados repetindo-

se o ciclo do AG. O processo é interrompido quando o número máximo de geração é alcançado ou por critérios de convergência das soluções.

Os indivíduos presentes na população final apresentam as melhores características de adaptação ao ambiente transferidas entre as gerações através do processo de seleção. Esses indivíduos representam o melhor conjunto de resposta para o problema abordado.

Observe que o AG proposto neste trabalho não é convencional devido a permanência dos pais na população após o processo de reprodução. Dessa forma, serão empregados operadores de controle populacional singulares, como o processo de extinção da população e a avaliação da convergência genética, para aumentar a variabilidade da população devido à alta taxa de elitismo presente no algoritmo proposto, gerada pela possibilidade da existência de indivíduos imortais sobreviventes ao processo de seleção. Assim, para retomar a variabilidade genética na população quando os processos convencionais, como reprodução e mutação, não são capazes de mantê-la será empregado a extinção completa da população e gerada uma nova população aleatória.

5.2 Algoritmo genético associado ao método grafo-algébrico proposto

Utilizando o algoritmo genético (AG) no problema de ilhamento é possível construir um conjunto de candidatos potenciais para a solução do projeto de ilhamento controlado em virtude do processo de avaliação e seleção do AG formarem uma população (conjuntos de cortes) que minimiza a função de custo sem a necessidade da otimização do valor limite de domínio (ε).

Os candidatos à solução do problema representaram os nós (barras) da matriz incidência nó-ramo que serão avaliados e selecionados utilizando-se a fatoração triangular inferior da matriz incidência nó-ramo como da função de custo para encontrar o conjunto de corte que promove a interrupção do menor fluxo de potência entre as ilhas.

As principais etapas para a implementação do AG elaborado para o projeto de ilhamento controlado em redes de energia elétrica podem ser resumidas em:

- 1) Criação aleatória de uma população inicial de indivíduos uniformemente distribuída (soluções potenciais);

2) Avaliação, classificação e seleção dos indivíduos;

3) Geração dos descendentes através da recombinação (cruzamento) e inserções de perturbações através de mutações genéticas na nova população (pais e filhos).

Destaca-se que a função de avaliação dos indivíduos será concebida a partir da fatoração triangular inferior da matriz incidência H , ou seja, baseada no método grafo-algébrico proposto Bratfich e Theodoro (2017). Esta função de avaliação será a responsável por promover uma rápida e eficiente avaliação dos indivíduos na população ao longo das gerações do AG proposto.

5.2.1 Construção da população inicial de indivíduos

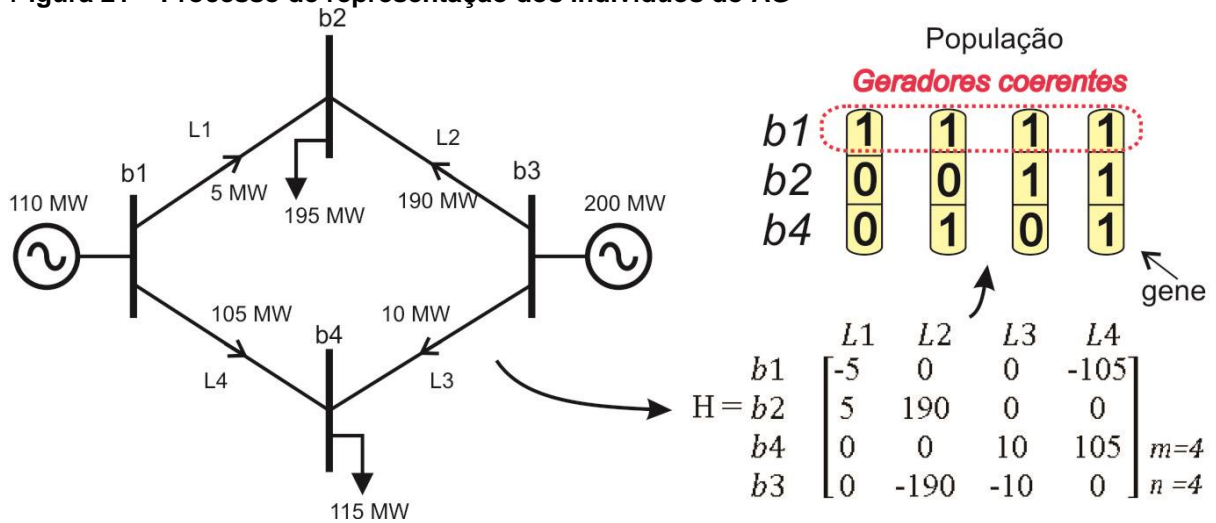
A população inicial é gerada de forma aleatória (uniforme) sendo representada por valores binários e seus indivíduos apresentam uma quantidade de genes em sua estrutura cromossômica igual a:

$$Q_{genes} = m - 1 \quad (35)$$

onde m é o número de nós do grafo associado ao SEP.

É importante salientar que os nós de geração em cada ilha foram agregados em dois nós equivalentes no grafo associado ao SEP, entretanto, para o processo do AG não há necessidade de representar um dos nós de geração como é apresentado no exemplo do SEP de 4 barras e 4 linhas na Figura 21. Dito isto, observa-se na população que os cromossomos de cada indivíduo representam um possível domínio (conjunto de nós) para o nó equivalente de geração armazenado na primeira linha da matriz H . Com isso, deve-se sempre garantir que em todos os indivíduos da população o primeiro gene seja igual a 1 e, portanto, os indivíduos que apresentarem valor nulo em tal gene durante o processo de seleção serão considerados inaptos (não adaptados) e eliminando da base genética.

Figura 21 – Processo de representação dos indivíduos do AG



Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Avaliação dos Indivíduos

Devido a singularidade da elaboração do algoritmo proposto, a avaliação dos indivíduos é dividida em três etapas:

1) Antes dos processos de cruzamento e mutação: os indivíduos que apresentarem o primeiro gene nulo serão descartados e os indivíduos da população considerados aptos serão avaliados através da função de avaliação.

É importante destacar que a função de avaliação quantifica a potência total interrompida entre os grupos de geradores coerentes.

2) Após os processos de cruzamento e mutação: uma nova etapa de classificação é realizada, e se o número de indivíduos na população atual for superior ao dobro da população inicial, faz-se uma nova etapa de extinção dos indivíduos excedentes devido aos pais sobreviverem ao processo de cruzamento compondo a nova geração junto aos filhos gerados;

3) Durante as gerações: se ocorrer a convergência cromossômica dos indivíduos na população durante um intervalo de gerações pré-definido, o melhor indivíduo da população é armazenado e a população inteira é descartada com o objetivo de gerar uma nova população, possivelmente, melhor adaptada.

A convergência cromossômica (CC) será avaliada a partir do valor médio da função de avaliação entre duas gerações consecutivas, e é dada por:

$$CC = \left| \frac{\sum_{j=1}^n Fit_{ind_j}}{n} - \frac{\sum_{k=1}^m Fit_{ind_k}}{m} \right| \leq Vg \quad (36)$$

com Fit_{ind_j} representando o valor da função de avaliação para o indivíduo j , m e n representam o número total de indivíduos da população em duas gerações r e $r + 1$ e Vg representa a tolerância da variabilidade genética.

As gerações que apresentarem valor de convergência cromossômica (CC) igual ou inferior ao valor limite de tolerância da variabilidade genética pré-estipulada serão consideradas estagnadas geneticamente e descartadas após o melhor indivíduo presente na população ser armazenado.

É importante destacar que se durante o processo de convergência cromossômica da população ocorrer uma oscilação da convergência superior à tolerância da variabilidade genética (Vg), devido aos processos de cruzamento e mutação, a contagem do número máximo de geração para a estagnação genética que levará a população para o processo de extinção será reiniciada possibilitando aos indivíduos heterogêneos gerados competirem com os outros indivíduos da população em relação a sua qualidade genética.

Observe que no processo da convergência cromossômica podem ser gerados indivíduos na população com genótipos diferentes, porém com a mesma carga fenotípica, ou seja, indivíduos que apresentam o mesmo valor para a função de avaliação portando sequências genéticas diferentes. Neste cenário, esses indivíduos tendem a dominar a população ao longo das gerações, entretanto, por apresentarem o mesmo fenótipo não haverá uma competição direta entre eles.

Dessa forma, o processo de extinção se apresenta como uma solução para esse evento, pois ao descartar-se a população, esses indivíduos poderão reaparecer devido a sua qualidade genética em relação à solução do problema e no término de todas as iterações a expressão desses genes será quantificada através de sua frequência e assim permitirá a comparação desses indivíduos em termos de expressão genética e da qualidade da carga genética apresentada.

A avaliação do indivíduo (cálculo da função de avaliação) é realizada através da soma da potência ativa que o indivíduo (domínio) acumula em sua fronteira (soma dos elementos do vetor A_{ind}) informada através de seus genes e representa o fluxo de potência total a ser interrompido entre as ilhas formadas.

Assim, a função de avaliação é calculada através da fatoração triangular inferior da matriz incidência nó-ramo por:

$$Fit_{ind} = \sum_{j=1}^n |A_{ind}| = \sum_{j=1}^n \left| \sum_{i=1}^{m-1} g_i \cdot h_{ij} \right| \quad (37)$$

com g_i representando os genes do cromossomo do indivíduo analisado, h_{ij} os elementos da matriz incidência nó-ramo e m e n são, respectivamente, o número de nós e ramos do grafo associado ao SEP. Deste modo os indivíduos mais aptos são aqueles cuja função de avaliação (Fit_{ind}) possuir um valor menor, tendo em conta, a necessidade de promover a menor interrupção de fluxo de potência ativa entre as ilhas e com isso o obter o melhor balanço entre carga e geração em cada subsistema isolado.

Para melhor compreensão da aplicação da fórmula, considere os dois indivíduos apresentados na Figura 22 para o SEP de 4 barras.

Figura 22 – Indivíduos do AG

		indivíduos	
		1	2
$b1$	1	1	1
$b2$	1	0	0
$b4$	0	1	1
		gene (g_i)	

Fonte: Autoria própria.

a função de avaliação para os indivíduos do exemplo é dada por:

$$Fit_{ind} = |g_1 \cdot h_{11} + g_2 \cdot h_{21} + g_3 \cdot h_{31}| + |g_1 \cdot h_{12} + g_2 \cdot h_{22} + g_3 \cdot h_{32}| \quad (38)$$

$$+ |g_1 \cdot h_{13} + g_2 \cdot h_{23} + g_3 \cdot h_{33}| + |g_1 \cdot h_{14} + g_2 \cdot h_{24} + g_3 \cdot h_{34}|$$

Assim, para o indivíduo 1 que apresenta a sequência genética $g_1 = 1$, $g_2 = 1$ e $g_3 = 0$, obtêm-se:

$$Fit_{ind_1} = |g_1 \cdot h_{11} + g_2 \cdot h_{21}| + |g_1 \cdot h_{12} + g_2 \cdot h_{22}| +$$

$$+ |g_1 \cdot h_{13} + g_2 \cdot h_{23}| + |g_1 \cdot h_{14} + g_2 \cdot h_{24}| \quad (39)$$

$$= |-5 + 5| + |0 + 190| + |0 + 0| + |-105 + 0| = 295$$

enquanto, para o indivíduo 2 que apresenta a sequência genética $g_1 = 1$, $g_2 = 0$ e $g_3 = 1$, obtêm-se:

$$\begin{aligned} Fit_{ind_2} &= |g_1 \cdot h_{11} + g_3 \cdot h_{31}| + |g_1 \cdot h_{12} + g_3 \cdot h_{32}| + \\ &\quad + |g_1 \cdot h_{13} + g_3 \cdot h_{33}| + |g_1 \cdot h_{14} + g_3 \cdot h_{34}| \\ &= |-5 + 0| + |0 + 0| + |0 + 10| + |-105 + 105| = 15 \end{aligned} \quad (40)$$

Tal processo é equivalente, ao cálculo da fatoração triangular inferior da matriz incidência nó-ramo considerando as linhas respectivas as posições não nulas dos genes do indivíduo, por exemplo, considerando os genes do indivíduo 2 e aplicando a fatoração na matriz (H) associada ao SEP de 4 barras e 4 linhas temos:

$$H_F = \begin{matrix} & & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b1 & & [-5 & 0 & 0 & -105] \\ b1 + b4 & & [-5 & 0 & 10 & 0] \end{matrix} \leftarrow A_{ind} \quad (41)$$

O vetor A_{ind} da potência presente na fronteira do grafo é dado por:

$$A_{ind} = b1 + b4 = [-5 \quad 0 \quad 10 \quad 0] \quad (42)$$

logo, a função de avaliação calculada a partir desse vetor é:

$$Fit_{ind} = \sum_{j=1}^n |A_{ind}| = |-5| + |0| + |10| + |0| = 15 \quad (43)$$

Observe que o indivíduo 2 apresenta maior aptidão em relação ao indivíduo 1 por possuir um valor menor de sua função de avaliação, de modo que sua carga genética apresenta qualidade superior e poderá produzir uma boa solução para o problema.

5.2.3 Processo de recombinação e mutação

Uma porcentagem da população é selecionada aleatoriamente para passar pelo processo de recombinação (cruzamento). A porcentagem da população a ser selecionada é definida através de um número gerado aleatoriamente (com

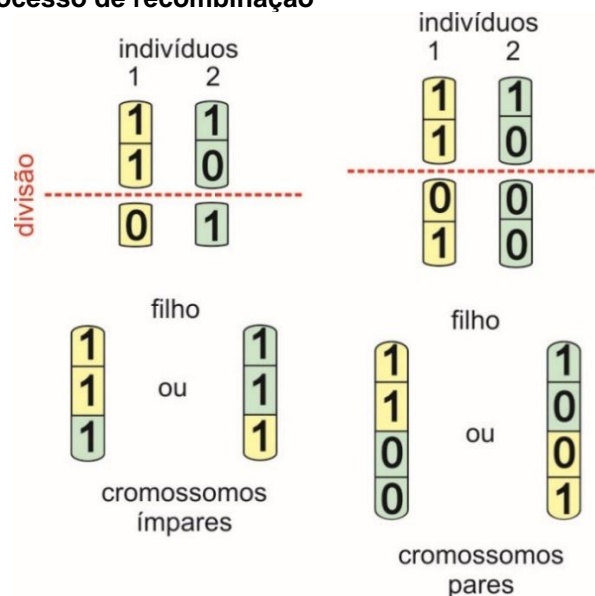
distribuição uniforme) entre zero e um limite superior pré-definido que representa a porcentagem máxima de cruzamentos que podem ocorrer.

Neste processo o cromossomo de cada indivíduo progenitor será dividido na posição central quando o número de genes (Q_{genes}) que o constitui for par e na posição $(Q_{genes} + 1)/2$ quando apresentar um número de genes ímpar como apresentado na Figura 23.

O descendente gerado no processo receberá uma parte da sua informação genética de cada progenitor.

Após o processo de recombinação a população (pais e filhos) poderá sofrer mutação na qual o indivíduo é escolhido aleatoriamente e poderá ter sua informação genética alterada em uma posição aleatória de seus genes.

Figura 23 – Divisão dos cromossomos para o processo de recombinação



Fonte: Autoria própria.

Após os processos de recombinação e mutação, os indivíduos na população são avaliados e selecionados. Caso o número total de indivíduos na população seja menor que a população inicial, então a população atual recebe novos indivíduos gerados aleatoriamente até atingir o valor de membros presentes na população inicial.

Entretanto, devido a presença dos pais junto aos filhos na população, se o número de indivíduos for superior ao dobro da população inicial, os indivíduos excedentes ao dobro serão descartados.

5.2.4 Critérios de parada

São adotados dois critérios de parada: (i) número máximo de gerações e (ii) número máximo de extinção da população devido a convergência cromossômica dos indivíduos na população.

5.2.5 Apresentação dos melhores indivíduos

Após alcançar o critério de parada, o melhor indivíduo da população atual e os selecionados por sua característica dominante, ao longo das gerações anteriores, são agrupados, avaliados e classificados segundo o valor de sua função de avaliação.

Seus respectivos conjuntos de corte são checados avaliando-se, através da matriz incidência nó-ramo, se existe ao menos um ramo que conecta os nós do domínio de modo que o subgrafo formado seja conexo.

Tal verificação avalia se os nós presente no domínio separam o grafo associado ao SEP em apenas dois domínios distintos, de modo a evitar o aparecimento de soluções ineficazes.

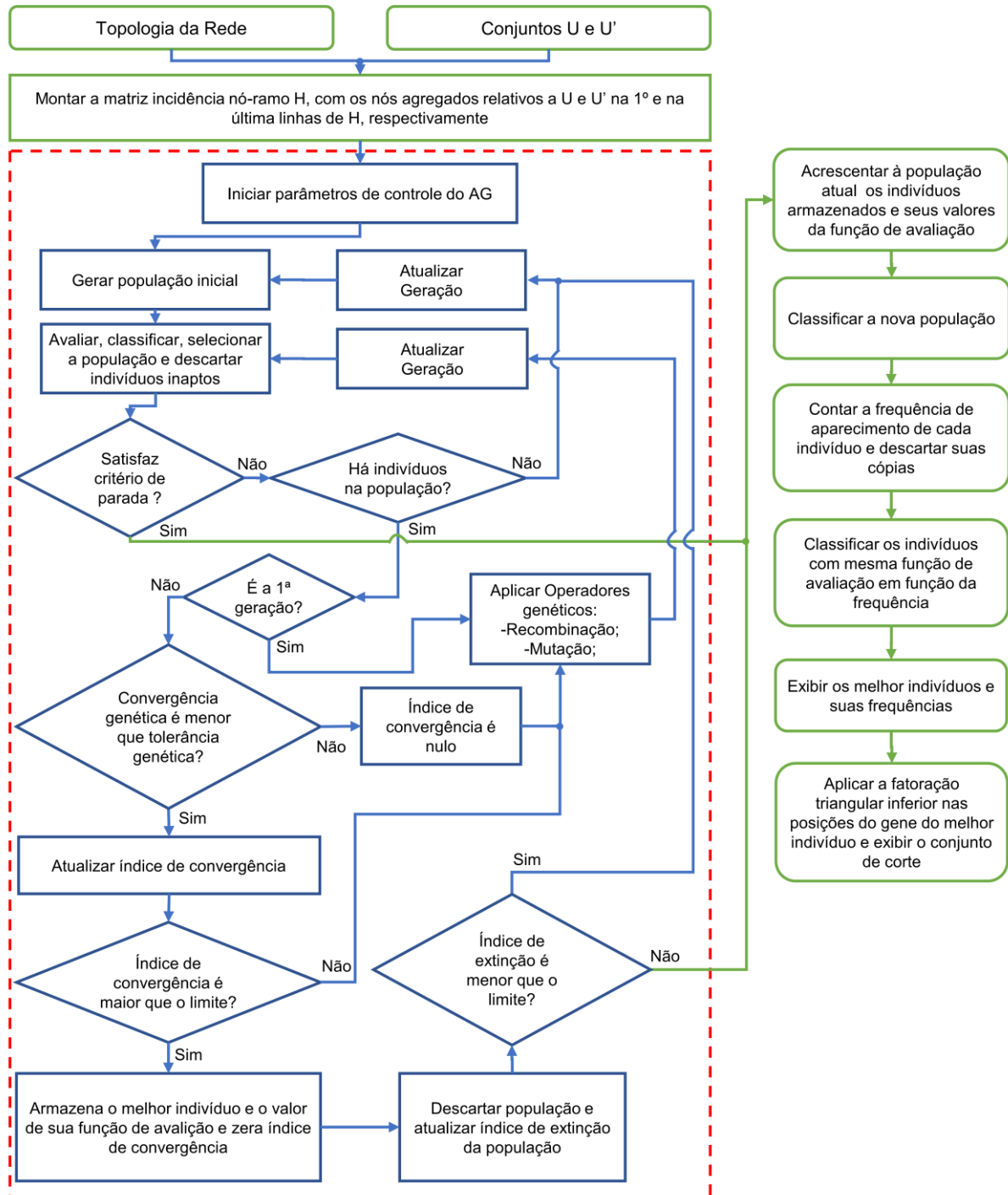
Observa-se que cada indivíduo determina um conjunto de corte específico, obtido através do vetor resultante da fatoração triangular inferior da matriz incidência nó-ramo (A_{ind}), tendo em conta que todo elemento não nulo neste vetor se relaciona univocamente a um equipamento de transmissão (ramo).

Por fim, se houverem indivíduos diferentes com o mesmo valor mínimo para a função de avaliação, aquele com a maior frequência (ocorrência de dominância) durante as gerações é escolhido como a melhor solução do problema, entretanto outros critérios relacionados ao problema podem ser adotados, por exemplo, como o conjunto de corte com o menor número de linhas interrompidas.

5.3 Algoritmo genético associado ao método grafo-algébrico proposto

O fluxograma para a implementação do AG proposto para o projeto de ilhamento controlado em redes de energia elétrica é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Algoritmo genético proposto

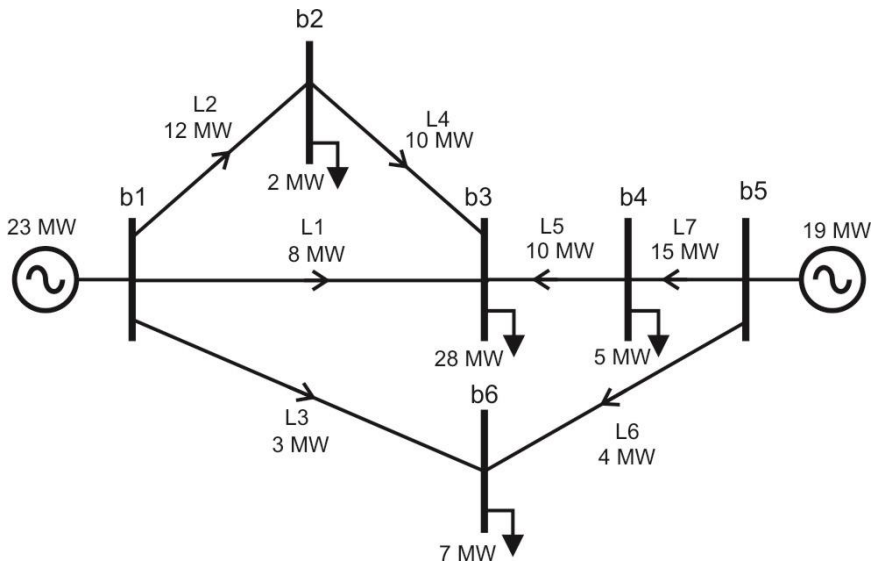


Fonte: Autoria própria.

5.3.1 Aplicação do algoritmo genético

Considere o SEP composto por 2 geradores, 6 barras e 7 linhas de transmissão representado na Figura 25.

Figura 25 - Sistema elétrico de potência com 6 barras e 7 linhas.



Fonte: Autoria própria.

A matriz incidência nó-ramo (H) do grafo associado ao SEP é construída seguindo o sentido do fluxo de potência entre as barras conforme equação 14. Assim, a matriz incidência nó-ramo (H) a ser fatorada para o SEP apresentado é:

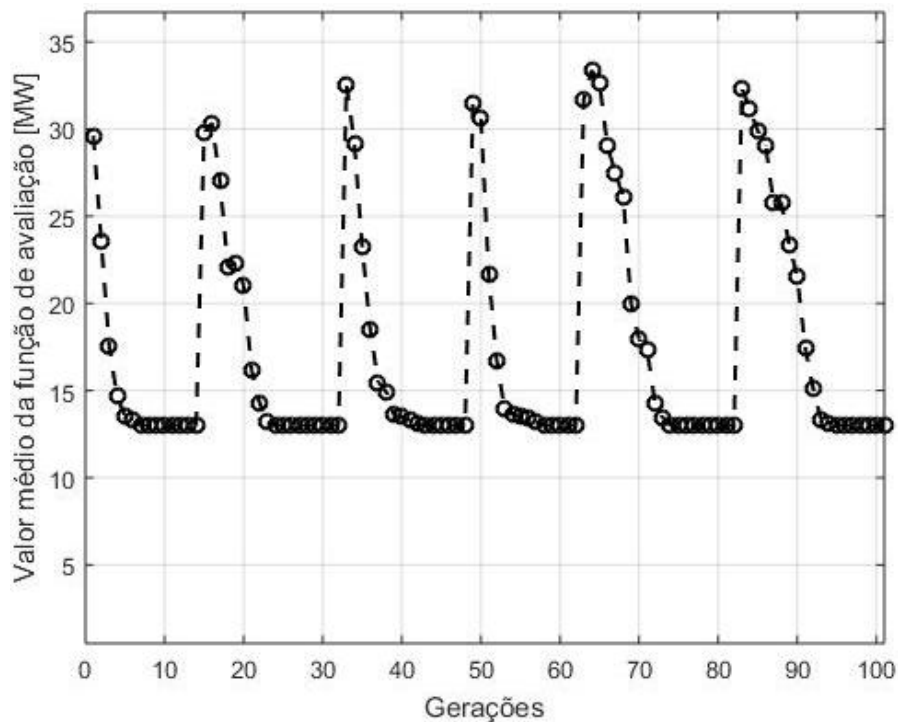
$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 \\ \begin{matrix} b1 \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b6 \\ b5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -8 & -12 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 10 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & -15 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (44)$$

Aplicou-se o AG ao sistema de 6 barras, apresentado na Figura 25, com os seguintes parâmetros: tamanho inicial da população = 100 indivíduos, critério de parada = 100 gerações, número máximo de gerações estagnadas = 10, número máximo de extinções da população = 10, probabilidade de cruzamento = 0,8, probabilidade de mutação = 0,01 e tolerância para convergência genética=1.

Ao final das gerações, o melhor indivíduo (domínio) encontrado com uma frequência de 99,17%, entre os melhores indivíduos de todas as gerações, apresentou como conjunto de corte $C = \{L3, L5\}$ com valor da função de avaliação igual a 13 MW.

O valor médio da função de avaliação com a evolução das gerações pode ser verificado na Figura 26.

Figura 26 – Valor médio da função de avaliação com a evolução da população para o sistema elétrico de potência com 6 barras / 7 linhas.



Fonte: Autoria própria.

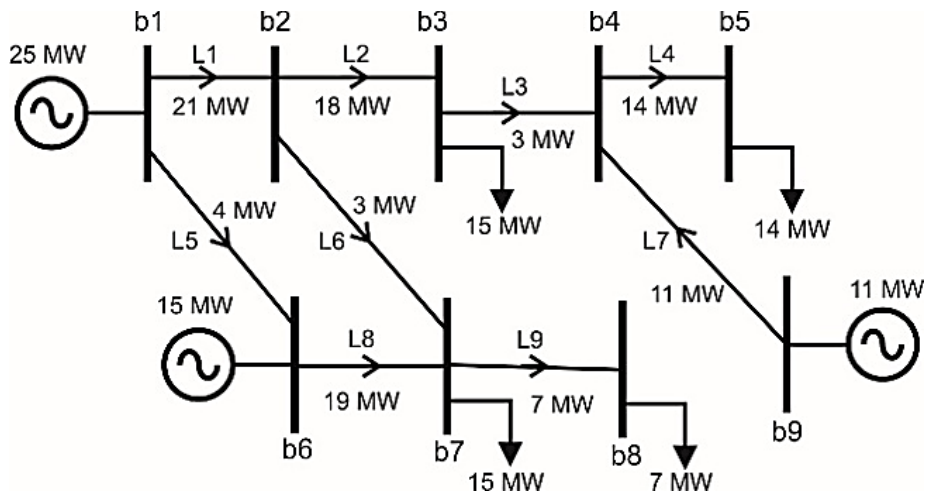
Através do método grafo-algébrico baseado na formação de domínios não foi possível encontrar o melhor conjunto de corte para o SEP analisado, entretanto, com a aplicação do AG foi possível encontrá-lo. É importante ressaltar que esta solução condiz com a solução ótima para o problema considerando-se a interrupção do menor fluxo de potência entre as ilhas e a manutenção da relação geração-carga dos subsistemas formados.

Desse modo, aplicou-se o algoritmo a outros sistemas de potência para verificar sua eficácia.

5.3.1.1 Aplicação do algoritmo genético em um sistema de 9 barras

Considere o SEP composto por 3 geradores, 9 barras e 9 linhas de transmissão representado na Figura 27.

Figura 27 - Sistema elétrico de potência com 9 barras e 9 linhas.



Fonte: Bratfich (2017, p. 349)

Nesse SEP com três geradores serão considerados coerentes os geradores conectados aos barramentos 1 e 6 que serão separados do gerador conectado ao barramento 9 para otimizar a aplicação da metodologia.

A matriz incidência nó-ramo com o nó agregado equivalente do grupo de geradores coerentes é representada por:

$$\tilde{H} = \begin{matrix} & & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 & L8 & L9 \\ \begin{matrix} b1 + b6 = G \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b5 \\ b7 \\ b8 \\ b9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -19 & 0 \\ 21 & -18 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 18 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & -14 & 0 & 0 & 11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 19 & -7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -11 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \end{matrix} \quad (45)$$

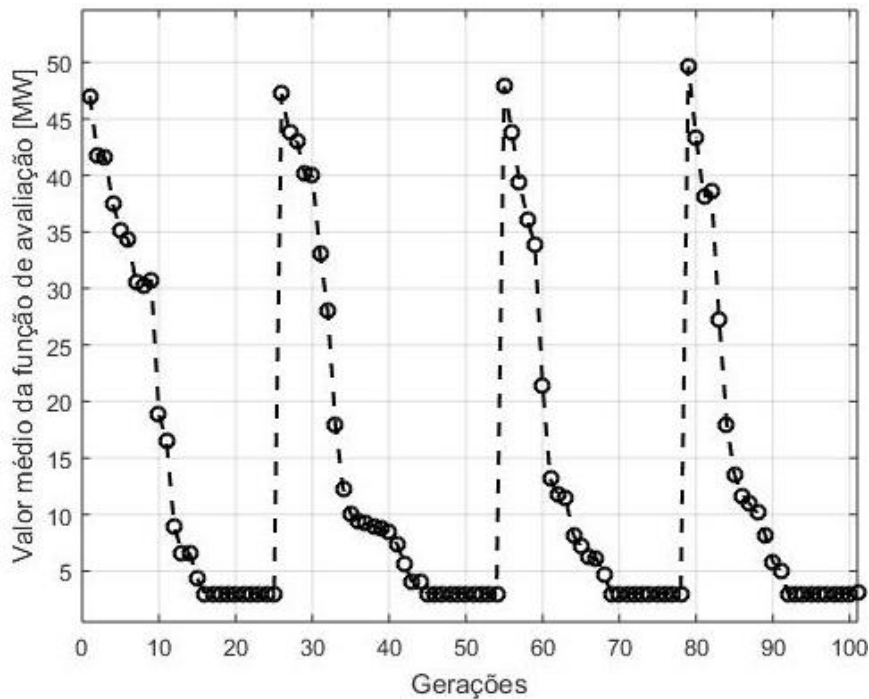
Aplicou-se o AG ao sistema de 9 barras, apresentado na Figura 27, com os seguintes parâmetros: tamanho inicial da população = 100 indivíduos, critério de parada = 100 gerações, número máximo de gerações estagnadas = 10, número

máximo de extinções da população = 10, probabilidade de cruzamento = 0,8, probabilidade de mutação = 0,01 e tolerância para convergência genética=1.

Ao final das gerações, o melhor indivíduo (domínio) encontrado com uma frequência de 98,11%, entre os melhores indivíduos de todas as gerações, apresentou como conjunto de corte $C = \{L3\}$ com valor da função de avaliação igual a 3 MW.

O valor médio da função de avaliação com a evolução das gerações pode ser verificado na Figura 28.

Figura 28 – Valor médio da função de avaliação com a evolução da população para o sistema elétrico de potência com 9 barras e 9 linhas.



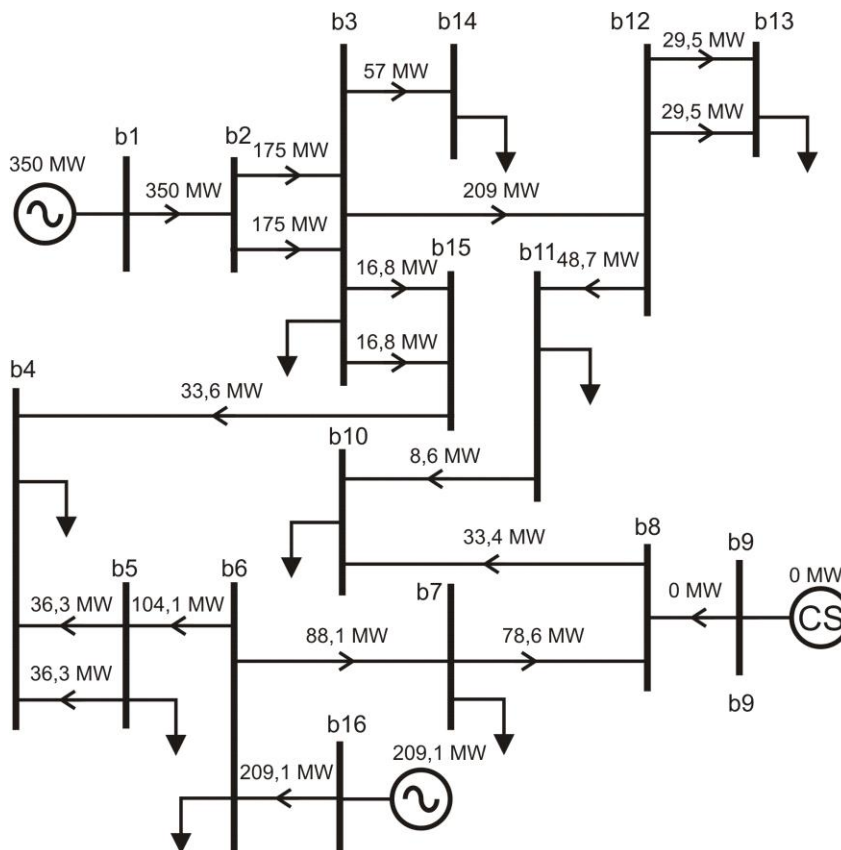
Fonte: Autoria própria.

O conjunto de corte encontrado no AG é o mesmo conjunto obtido através do método-grafo algébrico baseado na formação de domínios para o ajuste do valor limite do domínio em $\varepsilon = 0,78$ calculado a partir da equação 17 para o grupo de geradores coerentes G .

5.3.1.2 Aplicação do algoritmo genético em um sistema de 16 barras

Considere o sistema de 16 barras do Sistema-Teste Brasileiro (ALVES, 2007) com dados do sistema de Furnas da região Goiás/Brasília composto por 3 geradores, 16 barras e 20 linhas de transmissão representado na Figura 29.

Figura 29 - Sistema elétrico de potência com 16 barras e 20 linhas.



Fonte: ALVES (2007, p. 19).

Para associar o SEP ao grafo é necessário simplificar as linhas paralelas e as barras de passagem. Desse modo, realizou-se a formação do nó aglutinado equivalente dos grupos de geradores coerentes, a aglutinação das linhas paralelas (ramos) em linhas equivalentes, por exemplo $L(12,13)' \leftarrow L(12,13) + L(12,13)$, e a simplificação dos barramentos de passagem, barramentos em que o fluxo de entrada e saída são iguais, por exemplo o barramento b2 é uma barra de passagem, assim, interliga-se diretamente os barramentos 1 e 3.

Aplicando essas considerações na construção do grafo associado ao SEP e aglutinando os gerados coerentes conectados aos barramentos 9 e 16 que serão

separados do gerador conectado no barramento 1, para a otimização da demonstração do AG, se obtêm matriz incidência nó-ramo:

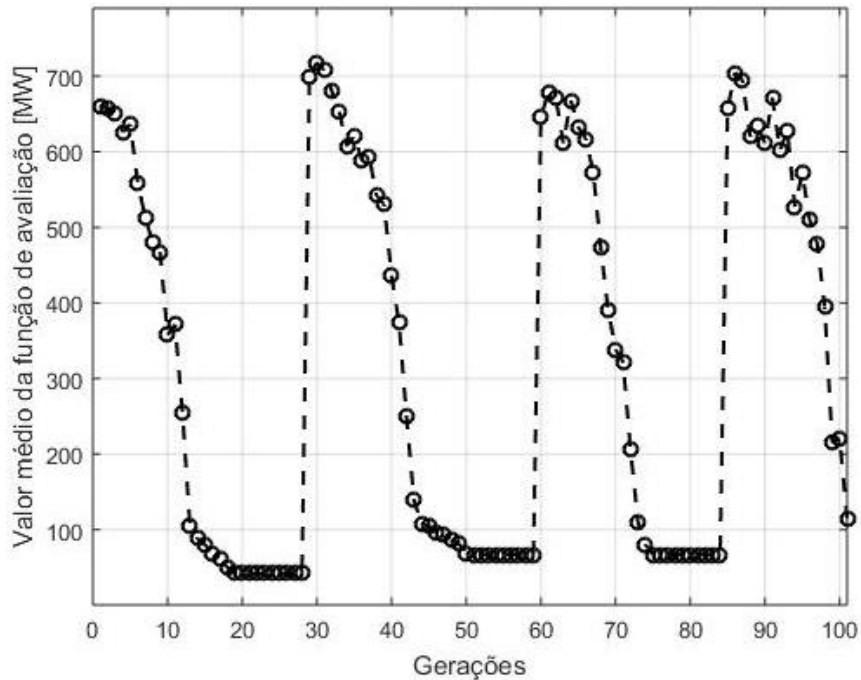
$$\bar{H} = \begin{matrix} & \begin{matrix} L1-2,2-3' & L3,12 & L3,14 & L3-15',15-4 & L4,5' & L5,6 & L6,7 & L6,16 & L7,8 & L8,10 & L10,11 & L11,12 & L12,13' \end{matrix} \\ \begin{matrix} b1'b2 \\ b2'b3'b15' \\ b5 \\ b6 \\ b7 \\ b8 \\ b10 \\ b11 \\ b12 \\ b13 \\ b14 \\ b15'b4 \\ b16+b9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -350 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 350 & -209 & -57 & -33,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -72,6 & 104,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -104,1 & -88,1 & 209,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 88,1 & 0 & -78,6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 78,6 & -33,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33,4 & 8,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -8,6 & 48,7 & 0 \\ 0 & 209 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -48,7 & -59 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 59 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 57 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 33,6 & 72,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -209,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (46)$$

Aplicou-se o AG ao sistema de 16 barras, apresentado na Figura 29, com os seguintes parâmetros: tamanho inicial da população = 100 indivíduos, critério de parada = 100 gerações, número máximo de gerações estagnadas = 10, número máximo de extinções da população = 10, probabilidade de cruzamento = 0,8, probabilidade de mutação = 0,01 e tolerância para convergência genética=1.

Ao final das gerações, o melhor indivíduo (domínio) encontrado com uma frequência de 24,37%, entre os melhores indivíduos de todas as gerações, apresentou como conjunto de corte $C = \{L3-15',15-4 \text{ e } L10,11\}$ com valor médio da função de avaliação igual a 42,2 MW.

O valor médio da função de avaliação com a evolução das gerações pode ser verificado na Figura 30.

Figura 30 – Valor médio da função de avaliação com a evolução da população para o sistema elétrico de potência com 16 barras e 20 linhas.



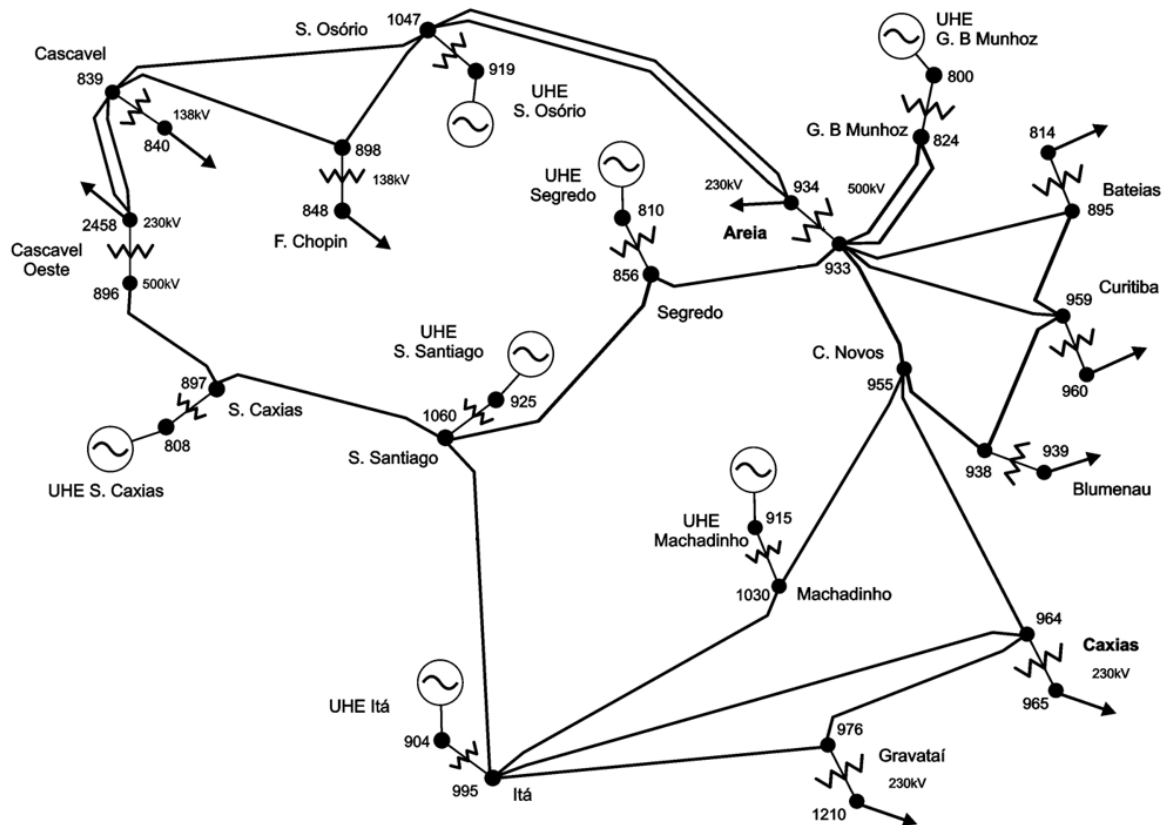
Fonte: Autoria própria.

Aplicou-se, também, o método grafo-algébrico ao SEP utilizando o valor limite de domínio $\varepsilon = 0,62$ calculado a partir da equação 17 para o gerador presente na barra 1 e foi encontrado o mesmo conjunto de corte proposto pelo AG.

5.3.1.3 Aplicação do algoritmo genético em um sistema de 33 barras

Considere o SEP composto por 33 barras com dados da malha da região sul do Brasil (ALVES, 2007), composto por 7 geradores, 33 barras e 50 linhas de transmissão apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Sistema elétrico de potência com 33 barras e 50 linhas.



Fonte: ALVES (2007, p. 20).

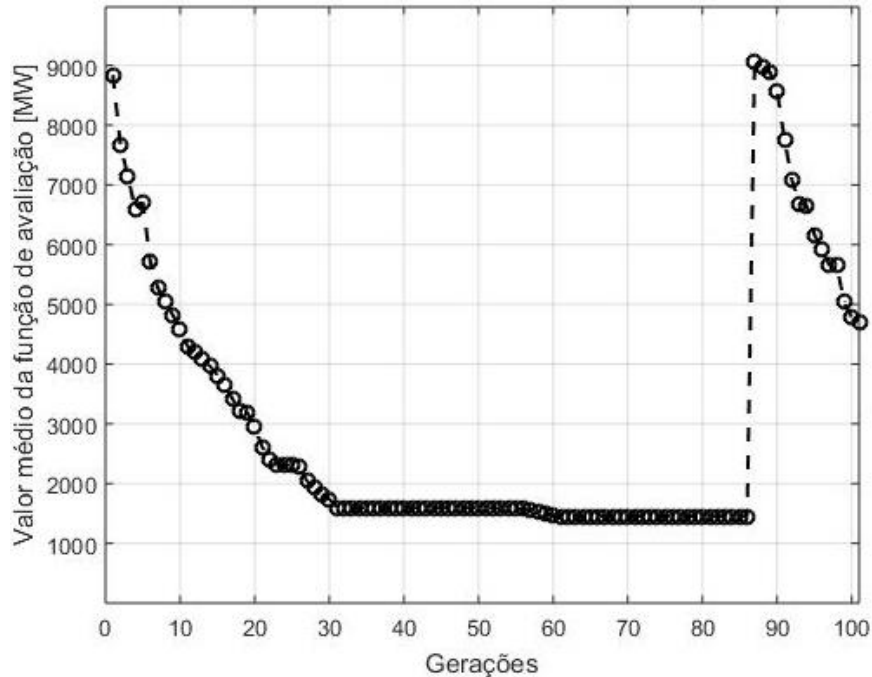
Neste caso, deseja-se separar os grupos de geradores coerentes G1 (800, 810, 915, 919) e G2 (808, 904, 925) que apresentam respectivamente $G1=3503,3$ MW e $G2=1658,7$ MW.

Aplicou-se o AG ao sistema de 33 barras, apresentado na Figura 31, com os seguintes parâmetros: tamanho inicial da população = 100 indivíduos, critério de parada = 100 gerações, número máximo de gerações estagnadas = 25, número máximo de extinções da população = 10, probabilidade de cruzamento = 0,8, probabilidade de mutação = 0,01 e tolerância para convergência genética=0,5.

Ao final das gerações, o melhor indivíduo (domínio) encontrado com uma frequência de 98,48%, entre os melhores indivíduos de todas as gerações, apresentou como conjunto de corte $C= \{L(995-1030), L(955-964), L(856-1060), L(839-2458)\}$ com valor da função de avaliação igual a 1452 MW e o fluxo líquido interrompido entre os subsistemas é 30,3 MW .

O valor médio da função de avaliação com a evolução das gerações pode ser verificado na Figura 32.

Figura 32 – Valor médio da função de avaliação com a evolução da população para o sistema elétrico de potência com 33 barras e 50 linhas.



Fonte: Autoria própria.

Nesse exemplo foi necessário aumentar o número máximo de gerações estagnadas para 25 em relação aos outros exemplos nos quais empregou-se o valor de 10. Observe, na Figura 32, que a população no intervalo de gerações entre 30 e 90 apresenta períodos nos quais a população começa a apresentar convergência genética, entretanto, devido ao aparecimento de indivíduos heterogêneos a função de avaliação apresenta um valor menor e o processo de contagem do número máximo de gerações estagnadas é reiniciado possibilitando ao AG encontrar a melhor solução para o problema.

Para fins de comparação, aplicou-se o método grafo-algébrico baseado na formação do domínio com valor limite de domínio $\varepsilon = 0,49$ determinado a partir da equação 17 partindo do grupo de geradores coerentes G2. Ao término do processo encontrou-se o mesmo conjunto de corte apresentado pelo AG.

Diante do exposto, o método apresentado é uma alternativa viável ao método grafo-algébrico baseado na formação de domínios, uma vez que não necessita da determinação ótima do valor limite da função de contribuição dos ramos.

6 OTIMIZAÇÃO DO VALOR LIMITE DO MÉTODO GRAFO-ALGÉBRICO BASEADO NA FORMAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ILHAMENTO

O método grafo algébrico baseado na formação de domínios de ilhamento tem sua eficácia correlacionada ao ajuste do valor limite de domínio (ε) como foi demonstrado anteriormente.

Todavia, dependendo da complexidade e tamanho do SEP, somente o ajuste não promoverá a convergência da metodologia para o melhor candidato. Diante desse fato, é necessário realizar um ajuste iterativo do valor limite junto ao processo de busca (*BFS*) a fim de estabelecer uma relação de equilíbrio entre os geradores e as cargas do domínio a ser formado.

Assim, neste capítulo é apresentado um possível processo de ajuste iterativo do valor limite do domínio de modo a satisfazer o critério de promover o corte do menor fluxo de potência entre as ilhas e manter o equilíbrio entre os geradores e as cargas do domínio a ser formado.

6.1 Valor limite do domínio (ε)

Considere a potência total de entrada na barra i (P_{TI_i}) definida por (BRATIFICH; THEODORO, 2017):

$$P_{TI_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ h_{ij}>0}}^n h_{ij} \quad (47)$$

com h_{ij} representando os ramos (linhas) presentes no nó i (barra).

Define-se, também, o fluxo médio de potência de entrada no nó i (barra) por:

$$\phi_i = \frac{P_{TI_i}}{n} \quad (48)$$

com ϕ_i representando o fluxo de potência médio de entrada no nó i , P_{TI_i} representa o fluxo total de potência que incide no nó i e n o número total de ramos que

fornecem fluxo de potência ao nó i ($h_{ij} > 0$).

Desse modo, o valor limite de domínio para o nó i pode ser calculado por:

$$\varepsilon_i = \frac{\phi_i}{P_{Tl_i}} \quad (49)$$

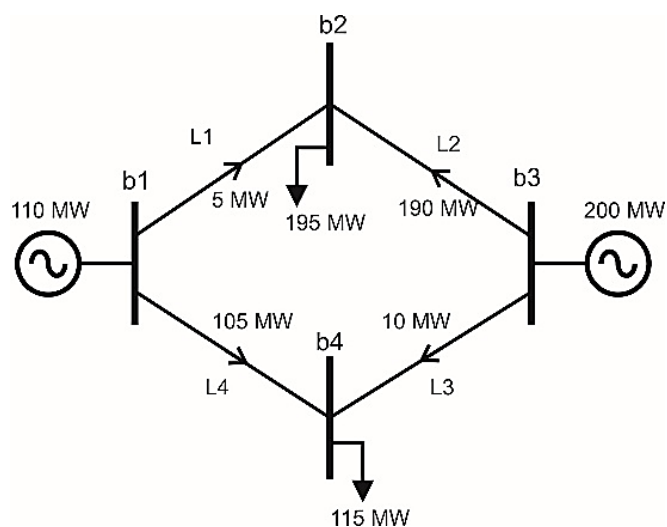
com ε_i representando o valor limite de domínio no nó i , ϕ_i representando o fluxo de potência média incidente ao nó i e P_{Tl_i} representa o fluxo total de potência que incide no nó i .

Assim, o valor limite (ε_i) é calculado para cada nó (barra) candidato e possibilitará a avaliação do nó i através da função contribuição definida na equação 16 para a metodologia apresentada anteriormente.

6.2 Processo iterativo de atualização do valor limite

Para melhor compreensão do processo iterativo de atualização do valor limite (ε) no método grafo-algébrico baseado na formação de domínios de ilhamento considere o SEP de 4 barras e 4 linhas representado na Figura 33.

Figura 33 - Sistema elétrico de potência com 4 barras e 4 linhas



Fonte: Adaptado de Theodoro et. al (2014, p. 5).

A matriz incidência nó-ramo para esse SEP, como apresentado na equação 14, é dada por:

$$H = \begin{matrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b1 & [-5 & 0 & 0 & -105] \\ b2 & [5 & 190 & 0 & 0] \\ b4 & [0 & 0 & 10 & 105] \\ b3 & [0 & -190 & -10 & 0] \end{matrix} \quad (50)$$

O *BFS* inicia sua busca por elementos não nulos ($h_{ij} \neq 0$) na primeira linha da matriz ($b1$) e ao encontrar o primeiro elemento $h_{11} = -5$ verifica a qual nó (barra) esse elemento está conectado através do ramo $L1$.

Encontrado o barramento de destino, barra 2 ($b2$), calcula-se a potência total de entrada na barra de destino (P_{TI_2}) dada por:

$$P_{TI_2} = \sum_{\substack{j=1 \\ h_{ij}>0}}^4 h_{2j} = h_{21} + h_{22} = 5 + 190 = 195 \quad (51)$$

calcula-se o fluxo médio de potência de entrada no nó - barra 2 ($b2$):

$$\phi_2 = \frac{P_{TI_2}}{2} = \frac{195}{2} = 97,5 \quad (52)$$

e calcula-se o valor limite (ε_2) no nó - barra 2 ($b2$):

$$\varepsilon_2 = \frac{\phi_2}{P_{TI_2}} = \frac{97,5}{195} = 0,5 \quad (53)$$

Então, calcula-se a contribuição do ramo ($L1$) para com o nó - barra 2 ($b2$):

$$C_{12} = \frac{|h_{11}|}{P_{TI_2}} = \frac{|-5|}{195} \cong 0,03 \quad (54)$$

o valor calculado na função contribuição é inferior ao valor limite ($C_{12} < \varepsilon$), portanto a

barra 2 (b_2) não pertence ao domínio formado pela barra 1 (b_1).

O *BFS* continua avaliando os elementos da barra 1 (b_1) em busca de outro elemento não-nulo e encontra o elemento $h_{14} = -105$, então verifica-se a qual nó (barra) esse elemento está conectado através do ramo L_4 .

Encontrado o barramento de destino, barra 4 (b_4), na matriz incidência nó-ramo posicionado na linha 3, calcula-se a potência total de entrada na barra (P_{TI_3}) dada por:

$$P_{TI_3} = \sum_{\substack{j=1 \\ h_{ij}>0}}^4 h_{3j} = h_{33} + h_{34} = 10 + 105 = 115 \quad (55)$$

calcula-se o fluxo médio de potência de entrada no nó - barra 4 (b_4):

$$\phi_3 = \frac{P_{TI_3}}{2} = \frac{115}{2} = 57,5 \quad (56)$$

e calcula-se o valor limite (ε_3) na barra 4 (b_4):

$$\varepsilon_3 = \frac{\phi_3}{P_{TI_3}} = \frac{57,5}{115} = 0,5 \quad (57)$$

calcula-se a contribuição do ramo (L_4) para com a barra 4 (b_4):

$$C_{43} = \frac{|h_{14}|}{P_{TI_3}} = \frac{|-105|}{115} \cong 0,91 \quad (58)$$

o valor da função contribuição é superior ao valor limite ($C_{43} \geq \varepsilon$), portanto, a barra 4 (b_4) pertence ao domínio formado pela barra 1 (b_1) e aplica-se a fatoração triangular inferior as barras 1 e 4 gerando um nó aglutinado ($b_1 + b_4$) produto dessas duas barras.

Ao final do processo encontra-se a seguinte fatoração da matriz incidência nó-ramo:

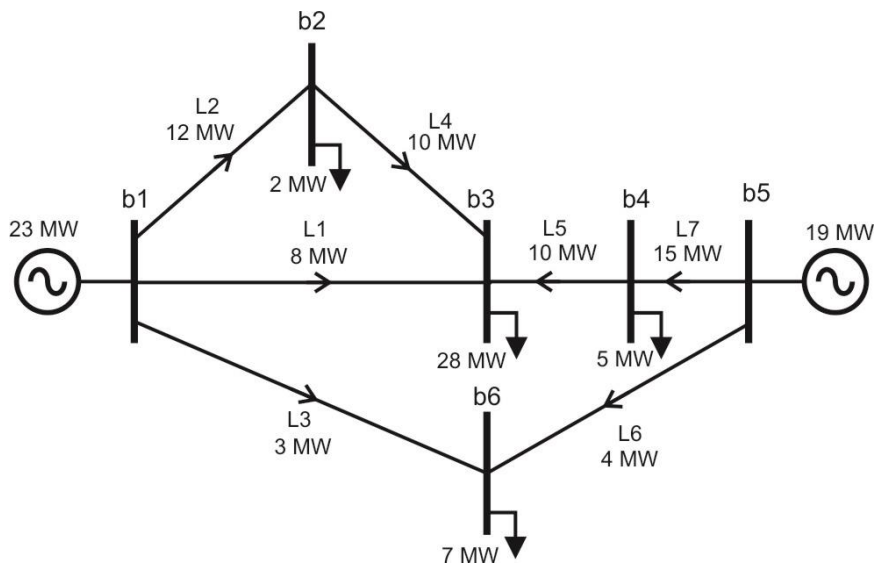
$$H_F = \begin{matrix} & & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b1 & & [-5 & 0 & 0 & -105] \\ b1 + b4 & & [-5 & 0 & 10 & 0] \end{matrix} \quad (59)$$

Os elementos não nulos da última linha fatorada da matriz H_F representam o conjunto de corte candidato a solução do problema $C(U, U') = \{L1, L3\}$ como encontrado anteriormente.

6.2.1 Aplicação do algoritmo grafo-algébrico no sistema de 6 barras

Considere o SEP composto por 2 geradores, 6 barras e 7 linhas de transmissão representado na Figura 25.

Figura 34 - Sistema elétrico de potência com 6 barras e 7 linhas.



Fonte: Autoria própria.

Observe que para este sistema não foi possível encontrar solução factível aplicando somente o método grafo algébrico e calculando-se o valor limite de domínio (ε) através da equação 17 e mesmo a variação do valor limite não resultou em sua solução como demonstrado anteriormente.

Entretanto, aplicando-se o método grafo-algébrico na matriz incidência nó-ramo (H) do grafo associado ao SEP empregando-se o valor limite iterativo encontrou-se a seguinte fatoração:

$$H_F = \begin{matrix} & & L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 \\ \begin{matrix} b1 \\ b1 + b2 \\ b1 + b2 + b3 \end{matrix} & & \begin{bmatrix} -8 & -12 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & 0 & -3 & -10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 10 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (60)$$

Os elementos não nulos da última linha fatorada da matriz H_F representam o conjunto de corte candidato a solução do problema $C(U, U') = \{L3, L5\}$ coincidindo com a solução encontrada anteriormente através do algoritmo genético.

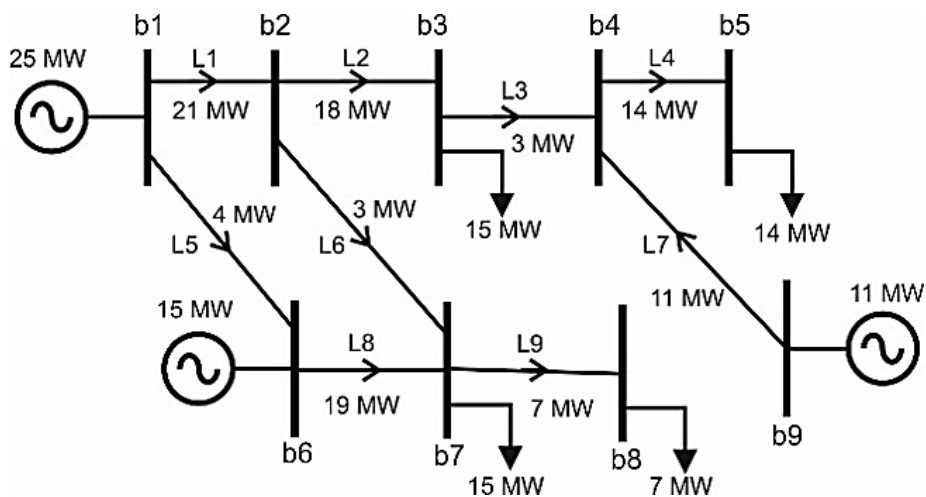
É importante ressaltar que esta solução condiz com a solução ótima para o problema considerando-se a interrupção do menor fluxo de potência entre as ilhas e a manutenção da relação geração-carga dos subsistemas formados.

Desse modo, aplicou-se o ajuste iterativo do valor limite em outros sistemas de potência para verificar sua eficácia.

6.2.2 Aplicação do algoritmo grafo-álgebraico no sistema de 9 barras

Considere o SEP composto por 3 geradores, 9 barras e 9 linhas de transmissão representado na Figura 35.

Figura 35 - Sistema elétrico de potência com 9 barras e 9 linhas.



Fonte: Bratfich (2017, p. 349)

Nesse SEP com três geradores, serão considerados coerentes os geradores conectados aos barramentos 1 e 6 que serão separados do gerador conectado ao barramento 9.

Aplicando-se o método grafo-algébrico na matriz incidência nó-ramo (H) do grafo associado ao SEP encontrou-se a seguinte fatoração é:

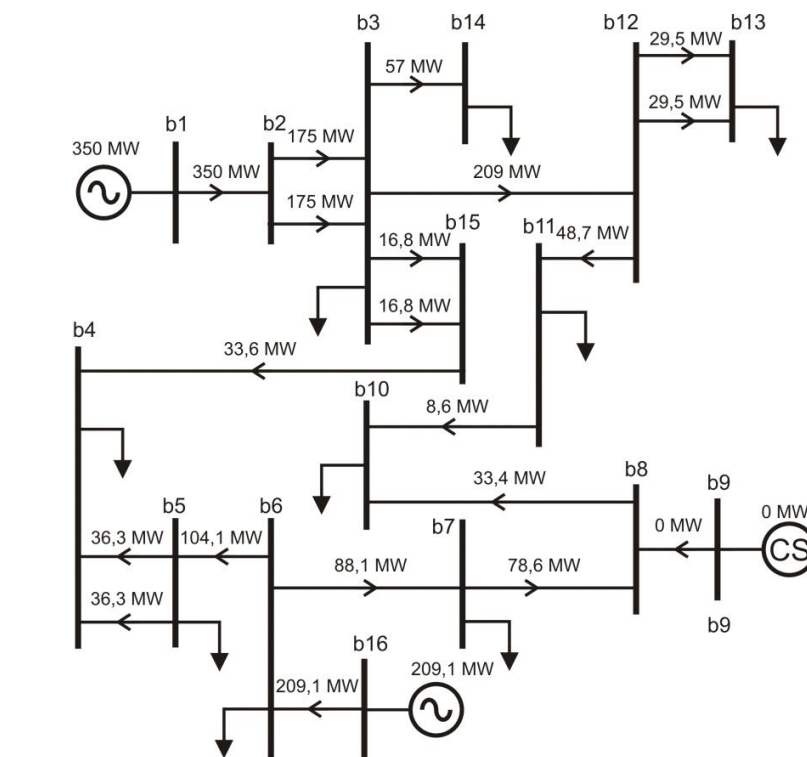
$$\tilde{H}_F = \begin{matrix} b1 + b6 = G \\ G + b2 + b7 = K \\ K + b3 + b8 \end{matrix} \begin{matrix} L1 & L2 & L3 & L4 & L5 & L6 & L7 & L8 & L9 \\ \left[\begin{array}{ccccccccc} -21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -19 & 0 \\ 0 & -18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7 \\ 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (61)$$

Os elementos não nulos da última linha fatorada da matriz H_F representam o conjunto de corte candidato a solução do problema $C(U, U') = \{L3\}$. Esse conjunto é o mesmo encontrado anteriormente através do algoritmo genético e para o ajuste do valor limite do domínio em $\varepsilon = 0,78$ determinado com a equação 17 no método grafo-algébrico.

6.2.3 Aplicação do algoritmo grafo-algébrico no sistema de 16 barras

Considere o sistema de 16 barras do Sistema-Teste Brasileiro (ALVES, 2007) com dados do sistema de Furnas da região Goiás/Brasília composto por 3 geradores, 16 barras e 20 linhas de transmissão representado na Figura 29.

Figura 36 - Sistema elétrico de potência com 16 barras e 20 linhas.



Fonte: ALVES (2007, p. 19).

Aplicando o método grafo-algébrico ao SEP considerando os barramentos 9 e 16 um grupo de geradores coerentes que serão separados do gerador conectado no barramento 1 encontrou-se a seguinte fatoração:

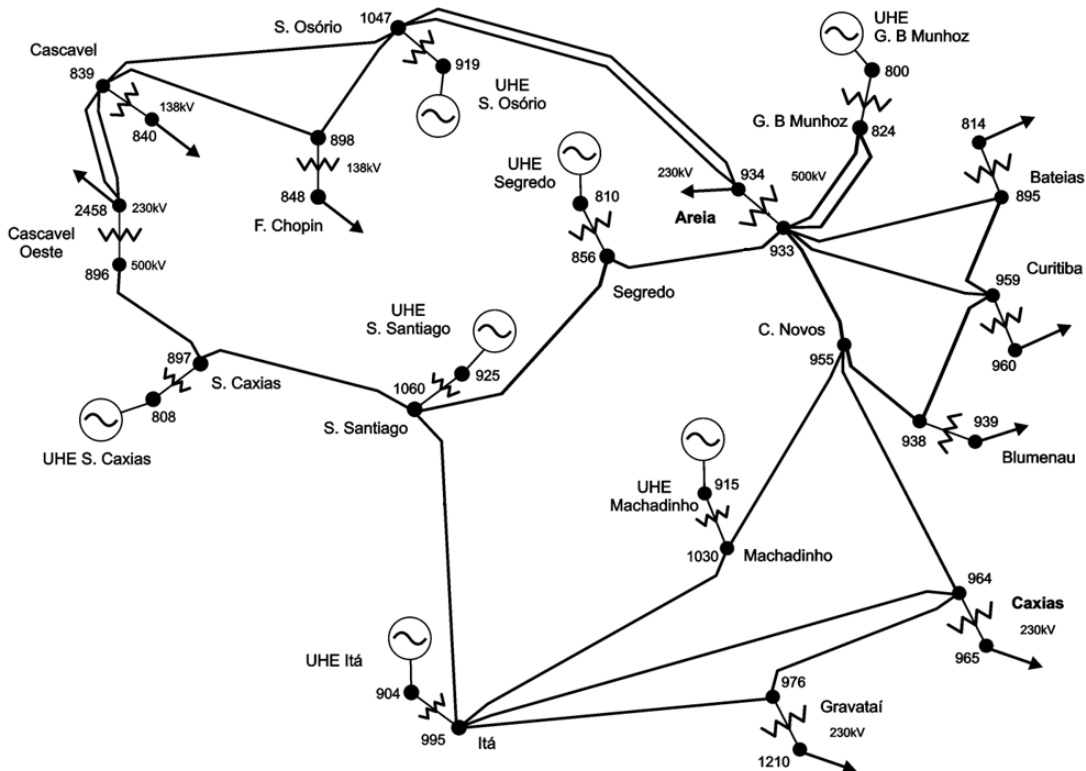
$$\tilde{H} = \begin{matrix} b1'b2=A \\ A+b2'b3'b15'=B \\ B+b12+b14=C \\ C + b11 + b13 \end{matrix} \begin{bmatrix} L1-2,2-3' & L3,12 & L3,14 & L3-15',15-4 & L4,5' \dots L8,10 & L10,11 & L11,12 & L12,13' \\ -350 & 0 & 0 & 0 & 0 \dots 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -209 & -57 & -33,6 & 0 \dots 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -33,6 & 0 \dots 0 & 0 & -48,7 & -59 \\ 0 & 0 & 0 & -33,6 & 0 \dots 0 & -8,6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

Novamente, encontra-se o mesmo conjunto de corte $C = \{L(3-15)', (15-4) \text{ e } L10,11\}$ obtido através do algoritmo genético e para o ajuste do valor limite do domínio em $\varepsilon = 0,62$ determinado com a equação 17 no método grafo-algébrico sem ajuste iterativo do valor limite.

6.2.4 Aplicação do algoritmo grafo-algébrico no sistema de 33 barras

Considere o SEP composto por 33 barras com dados da malha da região sul do Brasil (ALVES, 2007), composto por 7 geradores, 33 barras e 50 linhas de transmissão, apresentado na Figura 31.

Figura 37 - Sistema elétrico de potência com 33 barras e 50 linhas.



Fonte: ALVES (2007, p. 20).

Aplicando o método grafo-algébrico ao SEP considerando os barramentos G1 (800, 810, 915, 919) um grupo de geradores coerentes que serão separados dos geradores G2 (808, 904, 925) encontrou-se o conjunto de corte $C = \{L(995-1030), L(955-964), L(856-1060), L(839-2458)\}$ que é o mesmo conjunto de corte anterior obtido através do algoritmo genético e para o ajuste do valor limite do domínio em $\varepsilon = 0,49$ determinado a partir da equação 17 no método grafo-algébrico.

Desse modo, o emprego do valor limite (ε) iterativo possibilitou encontrar os melhores candidatos nos SEPs avaliados utilizando-se o método grafo-algébrico baseado na formação do domínio de ilhamento demonstrando a eficiência da metodologia proposta.

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta seção serão apresentadas as conclusões do trabalho e as perspectivas futuras.

7.1 Conclusões

O projeto de ilhamento controlado pode ser dividido em duas etapas: a primeira na qual são realizados os estudos para a identificação dos grupos de geradores coerentes no SEP e a segunda na qual é elaborado o projeto de ilhamento - separação física da rede.

Considera-se a segunda etapa do projeto uma tarefa complexa e desafiadora tendo em vista que os subsistemas separados através dessa etapa deverão manter seu funcionamento e o equilíbrio da relação geração-carga.

Dessa forma, concentrou-se os estudos deste trabalho na segunda etapa do projeto e uma nova proposta para a elaboração do projeto de ilhamento controlado (intencional) em redes de energia elétrica utilizando um novo método grafo-algébrico foi apresentado.

O método grafo-algébrico proposto é baseado na formação de domínio de ilhamento trazendo como inovação o conceito de domínio em substituição à função de custo (objetivo) usualmente empregada em problemas de otimização (busca/pesquisa) modelados através da teoria de grafos.

O conceito de domínio associado ao grafo permitiu à metodologia uma rápida convergência para encontrar os limites (fronteiras) do grafo e, assim, reduzir o custo computacional durante do processo de busca em amplitude (*breadth first search* - *BFS*) evitando a explosão combinatorial presente em outros métodos de busca.

A superposição de soluções do processo de fatoração triangular inferior presente na metodologia, junto à construção do domínio, permitiu aglutinar todas as soluções (caminhos) possíveis para encontrar o melhor candidato a solução do problema evitando-se um processo enumerativo de soluções e otimizando a metodologia.

Diante do exposto, o novo método grafo-algébrico provou-se adequada à análise de cortes em grafos (direcionados) e apresentou diversas vantagens como:

(i) implementação simples, (ii) eficiência computacional e (iii) identificação facilitada de fronteiras em domínios.

Utilizando-se a metodologia, as cargas foram agrupadas no domínio da geração que possui a maior contribuição para o atendimento de sua demanda de potência nos SEPs investigados promovendo a interrupção do mínimo de fluxo de potência na rede entre os subsistemas reduzindo o impacto nos SEP formados.

Entretanto, a eficácia da metodologia está correlacionada à otimização do valor limite de domínio (ε) que depende do tamanho e das características topológicas do SEP e deve ser ajustado iterativamente junto a formação do domínio de ilhamento o que pode tornar seu ajuste um segundo processo de otimização.

Dessa forma, a fim de evitar-se o processo de otimização do valor limite de domínio foi elaborado um algoritmo genético que tem sua função de avaliação dos indivíduos construída a partir do processo de fatoração triangular inferior da matriz incidência nó-ramo proposta na metodologia grafo algébrica apresentada.

A fatoração triangular inferior empregada na função de avaliação dos indivíduos habilitou o algoritmo a identificar o melhor indivíduo, como também determinar sua factibilidade (número de ilhas formadas) e o conjunto de corte (equipamentos a serem desligados) relacionado ao domínio armazenado no cromossomo do indivíduo.

Nos testes realizados, o algoritmo genético elaborado apresentou-se como uma alternativa viável ao método grafo-algébrico não necessitando a determinação ótima do valor limite do domínio (ε) e apresentando sempre os melhores candidatos a conjunto de corte dos SEP investigados.

Elaborou-se, também, um possível ajuste iterativo do valor limite do domínio (ε) baseado na relação entre o fluxo médio de potência de entrada na barra e o fluxo total de entrada na barra analisada. Esse ajuste demonstrou-se eficaz nos testes realizados.

Por fim, os SEPs investigados através das metodologias propostas corroboram para demonstrar a eficácia dos algoritmos apresentados para o desenvolvimento de projeto de ilhamento controlado em redes de energia elétrica, todavia, ressalta-se a necessidade de expandir as pesquisas para investigar a otimização do valor limite do domínio (ε) apresentada a fim de aplicar o método grafo-algébrico em sistemas de energia de grande porte.

7.2 Perspectivas futuras

Como perspectivas futuras deste trabalho, pretende-se expandir as pesquisas para investigar a otimização do valor limite do domínio (ε) a fim de aplicar o método grafo-algébrico proposto em sistemas de energia de grande porte e promover estudos noilhamento controlado diante de restrições de segurança com objetivo de prevenir a perda de estabilidade dos subsistemas gerados.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, E. A.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. “Fluxo de potência ótimo descentralizado utilizando algoritmos evolutivos multiobjetivo”. *Sba Controle & Automação*. v. 20, n.2, p.217-232, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-17592009000200009>>. Acesso em: 23 out. 2017.
- ALVES, W. F. “Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência,” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, 2007
- BRATIFICH, R.; THEODORO, E. A. R. “Projeto de ilhamento controlado em redes de energia elétrica utilizando um método grafo-algébrico.” In. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2017, Porto Alegre (Anais)*. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/sbai17/papers/paper_115.pdf>. Acesso em: 24 out. 2017.
- CARVALHO, T. L. A. (2015), “Aplicação de algoritmos colônia de formigas na reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em redes elétricas de distribuição”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica - Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- CHANG, C-F. “Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution system by ant colony search algorithm”. *IEEE Transaction on Power System*, v.23, n.4, p.1747-1755, 2008.
- CHANG, H-C.; KUO, C-C. “Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing”. *Electric Power System Research*, v.29, n.3, p.227-238, 1994
- COPEL, “Operação de redes de distribuição”. Manual de instruções técnicas de operação e manutenção de redes de distribuição – módulo critérios gerais de manobras, número: 160801, ag. 2010. Disponível em: <[http://copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/3C103291677FAEFC032577D500442E12/\\$FILE/MIT_160801_Criterios_Gerais_de_Manobra.pdf](http://copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/3C103291677FAEFC032577D500442E12/$FILE/MIT_160801_Criterios_Gerais_de_Manobra.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2017.
- DING, T.; SUN, H.; SUN, K.; LI, F.; ZHANG, X. Graph theory based splitting strategies for power system islanding operation. *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vol.1*, pp. 1-5, 2015.
- KUNDUR, P., “Power System Stability and Control,” Willey IEEE Press, 1994.
- LIN, W. M.; CHENG, F. S.; TSAY, M. T. “Distribution Feeder Reconfiguration with Refined Genetic Algorithm.” *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v.147, n.6, p.349-354, 2000.
- LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional*. Rio de Janeiro: Editora Brasport, 2006.
- SEDIGHIZADEH, M.; DAKHEM, M.; SARVI, M.; KORDKHEILI, H. H. “Optimal reconfiguration and capacitor placement for power loss reduction of distribution

system using improved binary particle swarm optimization. International” Journal of Energy and Environmental Engineering, v.5, n.3, 2014.

SAVULESCO, S.C. Grafos, Dígrafos e Redes Elétricas: aplicações na pesquisa operacional. Instituto Brasileiro de Edições Científicas, São Paulo – SP, 1980.

SISTEMA Interligado Nacional atende 98% do mercado brasileiro. Portal Brasil, Seção Infraestrutura, Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/sistema-interligado-nacional-atende-98-do-mercado-brasileiro>>. Acesso em: 30 out. 2017.

SOUZA, P.V.L. de. Um Método Grafo-Algébrico para Projeto de Ilhamento Controlado em Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2014.

SUN, K.; ZHENG, D.-Z. AND LU, Q. Searching for Feasible Splitting Strategies of Controlled System Islanding. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 153, no. 1, pp. 89-98, 2006.

TAKAHASHI, A. L. M. “Análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência considerando a atuação do tcsc e controladores suplementares de amortecimento: representação pelo modelo de sensibilidade de corrente”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia – UNESP, Ilha Solteira, 2013.

THEODORO, E.A.R.; BENEDITO, R. A. S.; LONDON, J. B. A.; ALBERTO, L. F. C. A Algebraic-Graph method for identification of islanding in power system grids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, [S.l], vol. 35, n. 1, p. 171-179, 2012.

THEODORO, E. A. R.; MANSOUR, M. R.; SOUZA, P. V. L.; ALBERTO, L. F. C. . A Comprehensive Algebraic-Graph Approach for Intentional Islanding in Power System Grids: Solutions and Regularization. In: XX CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte - MG. Anais do XX CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2014. p. 1380-1387.

VITTAL, V.; HEYDT, G. The Problem of Initiating Controlled Islanding of a Large Interconnected Power System Solved as a Pareto Optimization. IEEE PES Power System Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 1-7, 2009.

WANG, X.; VITTAL V. System Islanding using Minimal Cutsets with Minimum Net Flow. IEEE PES Power System Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 379-384, 2004.

YOU, H.; VITTAL, V.; WANG, X. Slow Coherency-based Islanding. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, no.1, pp. 483-491, 2004.

WILSON, R. J. Introduction to Graph Theory. 4. ed. Harlow: Longman, 1996.

APÊNDICE A – Publicações referentes a esta pesquisa

A1 Eventos Regionais

BRATIFICH, R.; THEODORO, E. A. R. Projeto de Ilhamento Controlado em redes de Energia Elétrica utilizando um Método Grafo-Algébrico. In: XXII SICITE - Seminário de iniciação Científica e Tecnológica, 2017, Londrina - PR. Anais do XXII SICITE. Curitiba - PR: Editora da UTFPR. v. 1. p. 1-6.

A2 Conferências Nacionais

BRATIFICH, R.; THEODORO, EDSON A. R. Projeto de Ilhamento Controlado em Redes de Energia Elétrica utilizando um Método Grafo-Algébrico. In: XIII SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2017, Porto Alegre - RS. Anais do XIII SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Porto Alegre - RS: SBA, 2017. v. 01. p. 345-350.

BRATIFICH, R.; THEODORO, EDSON A. R.; BISPO, BRUNO C.; SPATTI, DANILO H. Intentional Islanding using Genetic Algorithms and Algebraic-Graph Techniques. In: VII SBSE - VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2018, Niterói - RJ. Anais do VII SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - RJ: SBSE, 2018. v. 01. p. 1-6.

A3 Artigos em periódicos

BRATIFICH, R.; SPATTI, DANILO H.; THEODORO, EDSON A. R. Ant colony algorithm applied to projects of intentional islanding in energy networks. IEEE Latin America Transactions, vol. n, n.º n, p. n, a ser submetido em junho de 2018.