

Visualização de Dados Elétricos da Rede de Transmissão Brasileira

Paulo César M. Meira

Wu Shin-Ting (orientadora)

DCA – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

Caixa Postal 6101 – 13083-970 – Campinas

{meira,ting}@dca.fee.unicamp.br

Resumo

Uma proposta de visualização de dados elétricos da rede transmissão brasileira, baseado em diagramas unifilares, é apresentada. Para contemplar, de um lado, um número elevado de barras e conexões e, de outro lado, a baixa qualidade de dados disponíveis, propomos utilizar dois níveis de visualização: um nível até as cidades, baseado em dados geográficos, e um outro nível de maior detalhamento dentro das cidades, no qual são utilizados dados da topologia de sub-redes para alimentar geradores automáticos de diagramas unifilares.

1. Introdução

Devido à crescente complexidade do sistema elétrico brasileiro, há uma demanda por ferramentas de suporte ao estudo, à análise e à exploração de um grande volume de dados gerados por distintos algoritmos, como os disponíveis no Programa de Análise de Redes (Anarede) [6]. Tais ferramentas visam não só facilitar a interpretação e a correlação dos dados, possibilitando agilização nas tomadas de decisões, como também fornecer subsídios para formulação de novas hipóteses, propiciando o aprimoramento dos métodos e dos modelos existentes. Os diagramas unifilares são representações gráficas simplificadas dos elementos de uma rede elétrica, podendo ser considerados uma sub-classe de grafos desenhados sobre planos, onde os dispositivos da rede, como transformadores, compensadores reativos e geradores, são representados por barras, ou nós, e os condutores elétricos, que os interligam, como ramos.

Apesar de haver uma grande variedade de algoritmos de desenho automático de grafos sobre um plano [4, 7], não há muitos trabalhos que os explorem no contexto específico de diagramas elétricos unifilares [13]. Entre os fatores desta deficiência podemos destacar as características peculiares

que os diagramas unifilares devem atender: posicionamento das barras de acordo com a proximidade elétrica entre elas, representação distinta de barras, e minimização da área ocupada sobre a superfície. Programas de análise de sistemas de potência, como Anarede [6] e PowerWorld [2], são providos de algumas facilidades para visualizar graficamente a topologia da rede em estudo. No entanto, os nós devem ser posicionados manualmente pelo usuário, ou com base nos dados geográficos, para facilitar o roteamento das linhas. O desenho de uma rede contendo milhares de barras é, portanto, propenso a erros e a cruzamentos indesejáveis.

O desenho automático de grafos de arbitrário tamanho é um problema NP-difícil [4]. É comum explorar os dados complementares e as propriedades específicas dos diagramas para simplificar o problema. Apesar do uso crescente de ferramentas GIS para cadastro e visualização de redes elétricas, como Dados do Sistema Interligado Nacional (SINDAT), e do uso de informações geográficas no auxílio do posicionamento de barras dos diagramas unifilares [14, 12], não é ainda viável no contexto de estudos e análise de redes de transmissão a construção de qualquer tipo de diagramas com base nesses dados. Há casos de criação de elementos fictícios, sem uma correspondência geográfica, para a adequação dos dados reais aos modelos de simulação, ou da associação de vários elementos elétricos a um mesmo ponto geográfico. Isso pode ocorrer, por exemplo, quando o mapa de transmissão é de baixa resolução com várias barras representadas por um único ponto geográfico, ou através da

Para contornar estes problemas, distinguimos o desenho de diagramas unifilares em dois níveis de resolução:

- *Até as cidades*: desenho de diagramas a partir dos dados geográficos das barras.
- *Maior detalhamento*: desenho de diagramas com uso de geradores automáticos, que consideram somente dados de conectividade de um sub-conjunto da rede.

Cada um destes contextos de visualização de diagramas apresenta desafios distintos, alguns deles explorados na seção 2, que trata da utilização e tratamento dos dados geo-referenciados, e na seção 3, que detalha nossa implementação para geração automática de diagramas unifilares. Na seção 4 é apresentado o protótipo em desenvolvimento. Concluímos na seção 5 com uma perspectiva de trabalhos futuros.

2. Diagramas com uso de Dados Geográficos

Originalmente, utilizamos diretamente os dados geográficos das barras e das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) que tivemos acesso para, respectivamente, posicionar e rotear as linhas. Mas, observamos que há casos em que as extremidades de linhas de transmissão não coincidem com barras elétricas, resultando num diagrama visualmente desconexo quando se aumenta a escala de representação do mapa, e que nem sempre os dados geográficos são presentes.

Já que a consistência geométrica entre as extremidades das linhas e as barras elétricas é fundamental, propomos desenhar o diagrama do SIN utilizando as coordenadas geográficas das cidades onde se localizam as barras e aplicar um algoritmo de roteamento de linhas para desenhar as ligações entre elas. Uma abordagem mais simples é utilizar para cada conexão um segmento de reta. No entanto esta abordagem distorce as informações do diagrama, comprometendo sua interpretação, pois não é possível diferenciar linhas múltiplas das linhas simples [4].

Para possibilitar a distinção de linhas múltiplas, em conexões paralelas, foi elaborado um algoritmo que efetua a divisão do segmento original que representa cada linha em polilinhas compostas por três segmentos [4], sendo o segmento do meio, que liga os dois segmentos extremos, o segmento principal. Assumindo que as linhas múltiplas devem ter seus segmentos principais paralelos entre si, o nosso algoritmo de desenho compreende os seguintes passos (Figura 1):

1. Cálculo dos ângulos de saída a partir dos segmentos de reta originais (Figura 1.a).
2. Cálculo dos limites dos intervalos angulares associados a cada extremidade da reta (Figura 1.b).
3. Ajuste dos limites para que os ângulos sejam simétricos em relação ao ângulo de saída do passo 1.
4. Casamento dos limites das duas extremidades em relação aos ângulos de saída (Figura 1.c).
5. Distribuição uniforme dos segmentos de rede extremos na área útil determinada pelos limites (Figura 1.d).

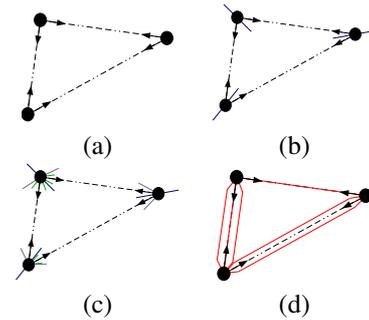


Figura 1. Desenho de linhas múltiplas

3. Diagramas a partir da Topologia da Rede

A alternativa proposta para visualização da conectividade das barras associadas a um mesmo ponto geográfico é utilizar algoritmos de desenho automático de diagramas unifilares, visto que a criação manual destes diagramas pode se tornar um processo demorado e propenso a erros.

No contexto de diagramas elétricos, é facilmente constatada a preferência dos usuários pela ortogonalização das linhas do diagrama. Infelizmente grande parte dos algoritmos de ortogonalização disponíveis na literatura não se aplica a grafos de ordem alta [9], que é uma característica comum de grafos associados a redes de transmissão de energia. No entanto, em 1997, Biedl *et al.* propuseram uma metodologia que nos pareceu adequada [5]. É uma metodologia unificada de ortogonalização de diagramas baseada em três etapas distintas: (1) Posicionamento dos nós, (2) Roteamento de arestas e (3) Atribuição de portas.

A independência de cada etapa proposta pelo Biedl *et al.* possibilita que, por exemplo, sejam utilizados diferentes algoritmos de posicionamento adequados para redes com características específicas, em função do número de nós ou da quantidade de ciclos presentes na rede, ou mesmo um algoritmo que permita a utilização de dados geo-referenciados incompletos. Essa estruturação em etapas também permite que se obtenha tanto um diagrama não-ortogonalizado, ao utilizar-se somente a etapa (1), como um diagrama ortogonalizado através das três etapas. Diagramas ortogonalizados facilitam a distinção de linhas múltiplas, enquanto os diagramas não-ortogonalizados são, em geral, mais legíveis, pois contêm menor número de linhas. Portanto, os dois modos são disponíveis como ferramentas complementares, além de atender as diferentes preferências dos usuários.

3.1. Posicionamento de Nós

O posicionamento dos nós é, no caso de redes elétricas, uma etapa crítica do algoritmo. Após o estudo comparativo de alguns algoritmos de posicionamento automático de nós [1], foi escolhido o algoritmo proposto por Mota *et*

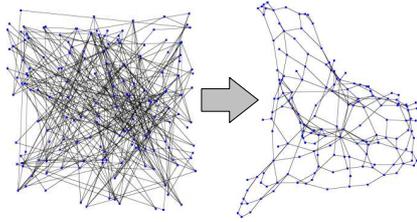


Figura 2. Posicionamento

al. [8] por apresentar resultados satisfatórios para a maioria dos critérios de avaliação que utilizamos e também por sua flexibilidade quanto aos tipos de conectividade presentes na rede (cíclicas ou em árvore). O algoritmo considera a rede como um sistema massa-mola onde as barras são partículas e as arestas, as molas cujas forças restauradoras são estimadas em função da distância entre os nós que elas ligam. É importante destacar que este algoritmo, em alguns aspectos bastante parecido com o *Spring Embedder* de Fruchterman e Reingold [10], foi desenvolvido e testado especificamente para redes elétricas. Na figura 2 está apresentado um exemplo de aplicação do algoritmo a uma rede com vários ciclos. Para automatizar totalmente a geração de diagramas, isto é, gerar diagramas unifilares sem a intervenção do usuário, os parâmetros do algoritmo foram pré-fixados, com exceção do comprimento natural das arestas que é calculado a partir da área e do número de nós. Na falta de um critério de parada mais adequado e eficiente para o algoritmo de posicionamento, foi utilizado um limite de iterações simples que atendesse a maioria dos casos, 250 iterações. Após a geração do diagrama final, os valores de ampliação e deslocamento são ajustados de forma que todo o diagrama se torne visível.

3.2. Roteamento das Arestas

Esta etapa consiste em rotear as arestas entre os nós, representados graficamente por barras, para que as conexões sejam visualizadas de forma legível. A implementação aplicou a idéia de substituição de padrões de segmentos [9], consistindo em substituir as linhas diretas de ligação por dois segmentos paralelos ao eixo vertical e um paralelo ao eixo horizontal. Conforme visto na figura 3 as arestas são roteadas somente a partir de um dos dois maiores lados da barra, que são sempre posicionadas horizontalmente.

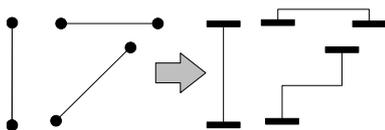


Figura 3. Roteamento por substituição

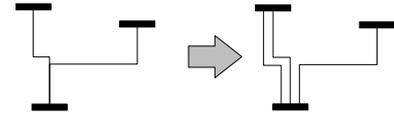


Figura 4. Atribuição de portas

3.3. Atribuição de Portas

A etapa de atribuição de portas foi implementada com base nas idéias apresentadas por Biedl *et al.* [5]. Consiste em posicionar as extremidades das arestas em cada barra, ajustando o tamanho da barra, se necessário. Para tanto, as arestas de cada nó são ordenadas pela coordenada horizontal dos nós que estão nas outras extremidades. Caso ocorram sobreposições ao posicionar uma extremidade, as extremidades das arestas são deslocadas sucessivamente para os extremos das barras, iniciando com as arestas mais próximas do centro da barra. A figura 4 ilustra o processo.

4. Visualização Integrada

Para validar as duas abordagens, descritas nas seções 2 e 3, na visualização dos estados da rede elétrica brasileira, está sendo desenvolvido um protótipo, chamado *VisciPower* [1, 3]. Apesar do algoritmo de roteamento automático de arestas entre as barras geo-referenciadas ainda não ter sido integrado ao protótipo, já é possível explorar algumas informações da rede de transmissão. Estão disponíveis funções como busca de barras, filtragem de dados e sobreposição de camadas geográficas, como hidrografia e meso-regiões.

A figura 5.a ilustra o primeiro nível de visualização, até as cidades, mostrando o SIN como um todo. Na figura 5.b temos uma ampliação em torno de Joinville, e já na figura 5.c está exposto o diagrama unifilar correspondente à sub-rede desta cidade. Este último diagrama foi o resultado do processo de geração automática do nível de detalhamento que implementamos, sendo que neste nível barras em vermelho são as barras externas, enquanto em azul são as barras associadas às coordenadas geográficas da cidade de Joinville.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou soluções para os dois principais problemas que identificamos ao projetarmos um visualizador para os dados elétricos da rede de transmissão brasileira. Estas soluções nos permitiram criar a base do futuro visualizador que permita a interação com *softwares* de simulação elétrica através de dois níveis de resolução.

No primeiro nível de resolução, até as cidades, o fato de utilizarmos os dados geográficos no desenho das

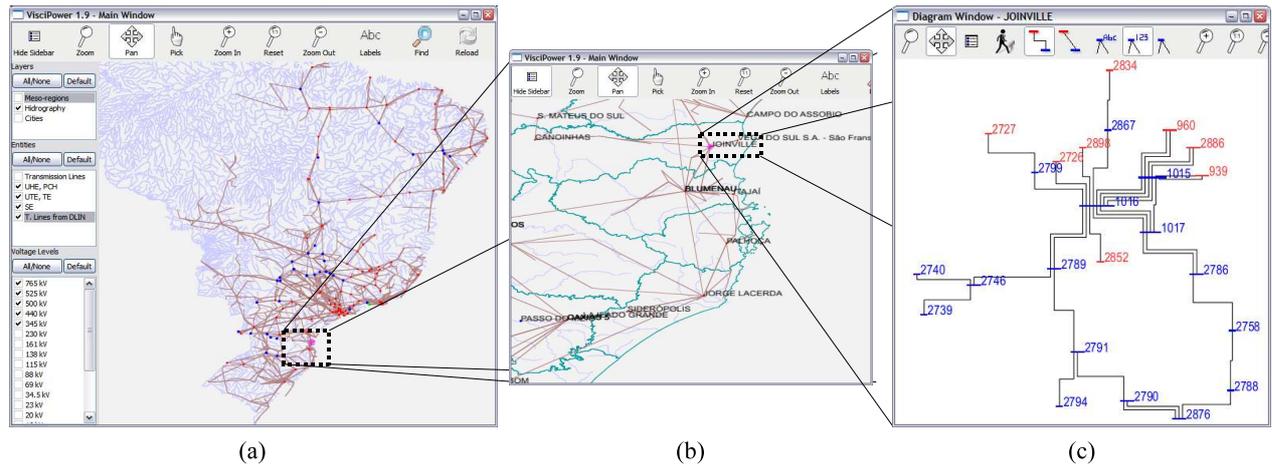


Figura 5. VisciPower

relações entre as barras contorna o problema de geração automática de diagramas unifilares com um número grande de barras. A integração de coordenadas geográficas e dados elétricos também abre a perspectiva de estabelecer visualmente correlações entre fenômenos naturais e elétricos, como a vazão de um rio com a potência gerada numa usina, e os grandes centros urbanos com os pontos de maior consumo energético. Para visualizar a topologia da sub-rede numa cidade implementamos um algoritmo de ortogonalização. Ele tem gerado bons resultados, porque tais sub-redes contêm usualmente algumas dezenas de nós e possuem poucas conexões cíclicas [1].

Há alguns aspectos a serem melhorados no posicionamento automático de nós, usado na primeira etapa do algoritmo de ortogonalização, sendo o mais notável a baixa resolução angular entre ramos de uma mesma barra. Já experimentamos o algoritmo com repulsão de arestas proposto por Lin e Yen [11], e pretendemos implementar um algoritmo híbrido, combinando vantagens do algoritmo de Mota *et al.* e as de Lin e Yen, para melhorar a qualidade dos resultados. Em relação às outras duas etapas, roteamento de arestas e atribuição de portas, foi observado que podem resultar em adicionais cruzamentos e sobreposições de arestas. Tais problemas serão analisados cuidadosamente.

Referências

- [1] Geração automática de diagramas unifilares. <http://www.dca.fee.unicamp.br/projects/vdx/meira/>.
- [2] Powerworld simulator. PowerWorld Corporation Website, <http://www.powerworld.com/>.
- [3] VisciPower. <http://www.dca.fee.unicamp.br/projects/vdx/siqueira/>.
- [4] G. D. Battista, P. Eades, R. Tamassia, and I. G. Tollis. *Graph Drawing: Algorithms for the Visualization of Graphs*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1998.
- [5] T. C. Biedl, B. P. Madden, and I. G. Tollis. The three-phase method: A unified approach to orthogonal graph drawing. 1353, 1997.
- [6] CEPEL. *ANAREDE - Programa de Análise de Redes - Manual do Usuário*, Janeiro 2003.
- [7] I. F. Cruz and R. Tamassia. Graph drawing tutorial. <http://www.cs.brown.edu/people/rt/papers/gd-tutorial/gd-constraints.pdf>.
- [8] A. de Assis Mota, L. T. M. Mota, and A. L. M. França. Metodologia orientada a objetos para visualização rápida de grafos não-dirigidos a partir da lista de arestas. In *Anais do XXXVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2004. São João Del Rei, MG.
- [9] M. Eiglsperger, S. P. Fekete, and G. W. Klau. *Drawing Graphs: Methods and Models*, chapter Orthogonal Graph Drawing, pages 121–171. Springer, Berlin, Germany, 2001.
- [10] T. M. J. Fruchterman and E. M. Reingold. Graph drawing by force-directed placement. *Software - Practice and Experience*, 21(11):1129–1164, 1991.
- [11] C.-C. Lin and H.-C. Yen. A new force-directed graph drawing method based on edge-edge repulsion. In *IV '05: Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation (IV'05)*, pages 329–334, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [12] L. T. M. Mota, A. de Assis Mota, and W. Shin-Ting. Using geospatial data to generate unifilar diagrams of electrical power systems. In *Proceedings of GeoInfo 2005*, pages 343–355, Novembro 2005.
- [13] Y. Ong, H. Gooi, and C. K. Chan. Algorithms for automatic generation of one-line diagrams. *IEE Proceedings-, Generation, Transmission and Distribution*, 147:292–298, 2000.
- [14] P. S. N. Rao and R. Deekshit. A novel algorithm for automatic generation of one-line diagram of distribution feeders. *Electrical Power Components and Systems*, 32:1255–1268, 2004.