

FERRAMENTA PARA SELEÇÃO DE CORREDOR DE LINHA AÉREA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO.

Fabiano Luis Belém³
Luciano Cunha de Araújo Pimenta²
Alexandre Ramos Fonseca¹
Danilo Teofilo Rezende²
Felipe Tanure Rocha²
Mateus Mendonça Bosque²
Renato Cardoso Mesquita²
Thiago Henrique Barbosa Carvalho Tavares²
Adevaldo Rodrigues de Souza⁴

¹Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri/ Departamento de Sistema de Informação
Caixa Postal 38, CEP 39100-000 Diamantina – MG, Brasil
arfonseca@gmail.com

² Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG/DEE
Caixa postal 486, Cep 30161-970 Belo Horizonte – MG, Brasil
lucpim@cpdee.ufmg.br, mateusmb@gmail.com, mateusmb@gmail.com,
rencmbr@gmail.com, felipetanure@yahoo.com.br, thyver@yahoo.com.br,
diguiniu@yahoo.com.br

³Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG/IGC
Caixa postal 486, Cep 30161-970 Belo Horizonte – MG, Brasil
flb.geo@gmail.com

⁴Companhia energética de Minas Gerais
Caixa postal 80, Cep 30190-131 Belo Horizonte – MG, Brasil
adevaldo@cemig.com.br

Abstract. The airline transmission project comprises a series of complex spatial and temporal restrictions which should be taken into account simultaneously. The manual choice of a corridor for these airlines does not provide objective, quantitative and exhaustive information that the intelligent computational analysis can provide. Based in this, the purpose of this paper was the development of a system which can obtain the “optimal corridors” for the definition of transmission lines routes. Moreover, this system allows us to do comparisons between the relative costs of different solutions, being a certain restriction more or less important, transforming itself in an important tool for the decision-making in the planning, operation and maintenance sectors of electric energy companies. After conclusion and digital processing of the thematic maps which must be considered in the determination of an optimum corridor of the transmission lines, the overlap of the maps in raster representation was done, which provided a compound map that integrates information from each map. Finally, an optimization algorithm was applied to this result, which determined the optimum corridor between the initial and the final point of the line, minimizing the compound cost.

Palavras-chaves: Geographic Information Systems, Digital Image Processing, Optimization, Airlines transmission.

1 - Introdução:

O projeto de uma linha aérea de transmissão envolve uma série de restrições complexas e multidisciplinares que, conforme Labegalini et al.(1992), podem ser:

- características elétricas da linha, como nível de tensão, potência a ser transmitida, ampacidade, parâmetros elétricos da linha, cabos pára-raios, nível de isolamento, isoladores, aterramento, etc.;
- topografia da região;
- características estruturais envolvidas no cálculo dos suportes, fundações das torres, tensões mecânicas nos cabos, vibrações associadas à ação do vento, cargas pontuais, etc. ;
- questões térmicas, associadas ao aquecimento dos cabos (por passagem de corrente, exposição ao sol, aumento da temperatura ambiente), ou mesmo sua refrigeração por ação de ventos, o que influencia em sua dilatação e conseqüente variação de sua altura em relação ao solo ;
- questões ambientais ligadas ao desmatamento de extensas regiões, interferência eletromagnética, vibrações mecânicas, ruído, exposição de seres vivos à radiação eletromagnética, impacto estético, etc. ;
- travessias, distâncias de segurança, faixas de segurança, uso e ocupação da faixa, desapropriações;
- restrições econômicas ligadas ao custo do projeto.

O projeto é ditado por normas técnicas rígidas que devem ser observadas pelos projetistas da linha, em todos seus aspectos (ABNT - NBR 5422). Além disto, é importante frisar que o projeto de uma linha tem um horizonte mínimo de trinta anos, o que faz com que restrições temporais de uso da linha também sejam levadas em conta.

Se considerarmos apenas as restrições espaciais (clima, vegetação, relevo, áreas de risco ocupacional, travessias, restrições ambientais, custo de desapropriação, etc.) que devem ser levadas em conta para definir o "corredor" no qual a linha deve ser lançada, já se tem uma grande quantidade de interações espaciais complexas. Os dados armazenados em um sistema de informações geográficas seriam uma base ótima para se obter os critérios de decisão para a definição deste corredor, mas estes dados estão dispostos em uma grande quantidade de mapas temáticos diferentes, sendo difícil raciocinar levando em conta todos os critérios em conjunto.

2 - Justificativa:

A técnica de "overlay de mapas" (Berg et al., 2000, Berry, 2004) pode ser utilizada para combinar os mapas temáticos para visualização, mas a escolha manual de corredor para linhas aéreas não fornece as informações objetivas, quantitativas e exaustivas que a análise computacional inteligente pode fornecer. De fato, processamentos adicionais múltiplos e genéricos poderiam ser efetuados em cada mapa temático, gerando mapas que combinariam custos, qualidade técnica e confiabilidade. A estes mapas seriam atribuídos pesos dependentes da importância de cada um deles. O "overlay" poderia, então, ser efetuado, e sobre seu resultado se aplicaria um algoritmo de otimização, que determinaria o corredor ótimo entre o ponto inicial e final da linha, minimizando o custo composto. Mais ainda, a técnica permitiria efetuar comparações, como por exemplo, os custos relativos de diferentes soluções, que pesassem mais ou menos determinado fator, transformando-se em uma ferramenta importante para a tomada de decisões dos projetistas das linhas de transmissão e do setor de planejamento, operação e manutenção das companhias energia. E,

por outro lado, a aplicação dessa tecnologia em linhas em operação poderia explicitar a condição atual desses projetos em relação à qualidade e confiabilidade remanescente do projeto concebido há vários anos, o que hoje é uma incógnita.

O principal motivador deste projeto é obter uma ferramenta computacional que possa ser utilizada pela empresas de energia elétrica para a determinação dos corredores ótimos das linhas de transmissão no planejamento da expansão e no projeto de novas linhas e que ainda possa ser utilizada no futuro para avaliação da qualidade e confiabilidade de linhas existentes. Sob o ponto de vista empresarial, a principal utilidade do sistema está na agilidade e abrangência em obter soluções para otimizar o investimento na expansão de novas linhas aéreas. Atualmente, as áreas de planejamento e projeto da expansão do sistema elétrico possuem várias fontes de informações entre mapas em papel, mapas digitais e outras fontes de dados. Isto gera várias etapas de trabalho e até vários retrabalhos para definição de uma nova rota de linhas de transmissão. Dessa forma, espera-se dar um salto de tecnologia amplamente digital e com técnicas de otimização a todo esse processo de engenharia. Também é importante notar que, para as linhas existentes, o desenvolvimento da base de dados e metodologia de tratamento dos dados georeferenciados proposta nesse projeto, irá racionalizar o uso da ferramenta de geoprocessamento pelas equipes de planejamento, projeto, operação e manutenção, através de uma atualização de informações padronizadas nas rotas existentes, podendo verificar a situação atual das mesmas e racionalizando as inspeções de campo para verificação de condições específicas. Destaca-se ainda a memória descritiva de processo de seleção das rotas em meio digital para facilitar o arquivamento eletrônico da documentação e recuperação posterior de informações sobre tomada de decisão na seleção de rotas ótimas.

3 - Metodologia de trabalho:

Utilizou-se o programa gratuito “Spring” neste projeto. Este programa possui uma ampla gama de funções em processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica do terreno e consulta a banco de dados espaciais. Usou-se este programa no processamento digital de imagens com o objetivo de criar a base cartográfica deste projeto.

Os mapas no programa Spring podem ser representados em formas vetoriais e raster. Neste programa existe uma perda de precisão dos limites dos objetos representados na imagem ao se transformar de formas vetoriais para raster, uma vez que bordas contínuas são discretizadas de acordo com a resolução da imagem de saída.

O Spring possui funcionalidades para transformação de mapas vetoriais em raster e de raster para vetorial. Isto fez com que vários mapas vetoriais pudessem ser rasterizados obtendo uma maior quantidade de dados para a composição dos mapas.

Considere o projeto da rota de uma linha de transmissão, com mapas temáticos que podem representar características de clima, vegetação, relevo, áreas de risco ocupacional, travessias, restrições ambientais, custo de desapropriação, etc. O objetivo inicial deste trabalho é obter um mapa composto que integre as informações vindas de cada um dos mapas e obter uma rota de custo mínimo no mapa composto.

Para determinar o mapa composto, utiliza-se a sobreposição, ou “overlay” dos mapas. As técnicas que podem ser utilizadas variam de acordo com o modelo de representação dos mapas, isto é, se os mapas têm representação raster, ou se os mapas têm representação vetorial.

Uma imagem em formato matricial ou raster é representada como uma matriz de pixels. A cada pixel, o qual pode ser acessado individualmente pela sua representação

(linha, coluna), associa-se um valor referente ao atributo em estudo. Neste trabalho, utilizam-se mapas em formato raster, uma vez que existe um grande acervo de imagens no Brasil neste formato.

A resolução do mapa raster é determinada pela resolução do pixel. Por exemplo, se uma imagem representa uma região de 200 km por 200 km através de uma matriz com 50 por 50 posições, então cada pixel representa uma área de 4 km por 4 km.

A grande vantagem de uma imagem raster está no acesso direto a qualquer posição do mapa por meio de sua estrutura matricial. Isso torna simples o processamento de seus atributos. As análises espaciais feitas neste tipo de imagem são simples e regulares. Entretanto, este tipo de imagem exige grande espaço de armazenamento, pois quanto maior o pixel menor a quantidade de informação espacial.

A imagem raster utilizada neste trabalho foi a imagem CBERS cujo a identificação é CB2CCD-152/123 da seguinte data: 23/09/2004. Esta imagem foi escolhida por ser da área de estudo para o planejamento de uma linha de transmissão. Além disso, esta imagem é da estação seca da área de estudo deste projeto, a decisão de adquirir a imagem nesta estação ocorreu porque fica mais preciso a identificação das feições geográficas relevantes ao planejamento de linha de transmissão.

A composição de mapas com representação raster é extremamente simples. Considera-se que os diversos planos de informação estão armazenados em uma matriz tridimensional $A[i,j,k]$, no qual a latitude e a longitude definem a localização de qualquer ponto na base $[i,j]$. O eixo k define a classificação do ponto em cada um dos vários mapas temáticos. A cada classificação estará associado um custo que será multiplicado pelo peso do seu respectivo mapa no overlay, como na equação abaixo:

$$W = \left\{ x, y, g(x, y) \mid g(x, y) = \sum_{i=1}^N w_i z_i(x, y) \right\} \quad (1),$$

onde $g(x,y)$ é o custo composto por unidade de comprimento do pixel (x,y) no mapa composto W , w_i é o peso atribuído ao i -ésimo mapa e $z_i(x,y)$ é o custo por unidade de comprimento do pixel (x,y) no i -ésimo mapa. A equação acima se refere à composição de N mapas temáticos.

Para que o overlay seja possível, os diversos mapas deverão possuir as mesmas resoluções de armazenamento, ainda que tenham sido criados em outras resoluções. A definição da resolução é a escolha do tamanho do pixel na composição dos mapas em formato raster e do número de linhas e colunas na matriz de representação. É comum que em uma análise espacial as variáveis que compõem os mapas temáticos apresentem fontes de dados diferentes e escalas diferentes, o que resultaria em possibilidades diferentes de resolução espacial. O procedimento indicado é a adoção da melhor resolução entre as praticadas (menor dimensão do pixel), de forma a não desperdiçar imagens de alta resolução.

As rotas das linhas de transmissão são determinadas por meio da utilização de algoritmos de busca em grafos. Foram estudados os seguintes algoritmos: A*(Mata; Mitchell, 1997), Programação Dinâmica (Monteiro, 2005), Dijkstra (Dijkstra, 1959). É possível encontrar a rota ótima, ou seja, de menor custo utilizando qualquer um dos três algoritmos. Entretanto o esforço computacional é variável.

O Algoritmo Programação Dinâmica (Dynamic Programming - DP), segundo Monteiro (2005), percorre todos os elementos (pixels) da matriz de custos e de forma iterativa, calcula os custos para se sair de um elemento origem pré-definido e chegar a cada um dos outros elementos. Após algumas iterações, obtém-se outra matriz que informa o caminho ótimo a ser seguido a fim de se chegar à origem, partindo-se de qualquer elemento desta matriz. Ele possui ordem de complexidade $O(n)$, onde “n” é o número de elementos da matriz de custos.

O algoritmo A* analisa a partir da marcação do ponto de origem da rota ótima na matriz de custos, todos os seus vizinhos determinando o custo para se chegar a cada um deles e ainda uma estimativa (heurística) do custo de se partir de cada vizinho e atingir o destino. Os vizinhos são incluídos em uma lista denominada “lista aberta”. Determina-se, então, o vizinho cujo custo total estimado do caminho que vai da origem ao destino, passando por este vizinho, é mínimo comparado aos demais. Ele deixa de fazer parte da “lista aberta” e passa para a lista denominada “lista fechada”. A partir daí, faz-se a mesma análise de custos para os vizinhos do último nó acrescentado à “lista fechada”. Resumindo, analisam-se os vizinhos de um determinado nó, escolhe-se o vizinho de menor custo e refaz essa análise sobre esse vizinho. O algoritmo termina quando é incluído na “lista fechada” o nó marcado como destino da rota ótima.

Cabe ressaltar que esse algoritmo não visitará, necessariamente, todos os nós que constituem a matriz de custos, já que o algoritmo termina sua execução quando encontra o nó destino. Com isso, é possível concluir que na determinação de rotas ótimas em que os nós de origem e destino estão localizados relativamente próximos um ao outro, em comparação às dimensões da matriz de custos, o algoritmo A* provavelmente será executado em um tempo menor quando comparado aos algoritmos que visitam todos os nós da matriz de custos (por exemplo, Programação Dinâmica e Dijkstra).

Este algoritmo, na forma como foi implementado, possui ordem de complexidade $O(n \log(n))$, onde “n” é o número de elementos da matriz de custos.

O funcionamento do algoritmo de Dijkstra é bastante similar ao A*. Porém, ao contrário do A*, que encontra apenas o caminho ótimo da origem ao destino, esse encontra o caminho de menor custo de todos os nós da matriz de custos até a origem (Dijkstra 1959). Quanto a esse aspecto, é possível dizer que ele se assemelha ao algoritmo DP.

Ele possui ordem de complexidade $O(n \log(n))$, onde “n” é o número de elementos da matriz de custos.

4 - Resultados:

A escolha do melhor algoritmo depende da configuração. A Tabela 1 apresenta o tempo decorrido para calcular o melhor caminho em diferentes situações. Na Tabela 1 foi utilizada uma matriz fixa 4000 x 4000 e alterou-se a origem e o destino:

1o teste: origem: (0,0) e meta: (3999,3999)

2o teste: origem: (1800,1800) e meta: (2200,2200)

3o teste: origem: (1000,1000) e meta: (3000,3000)

A Tabela 2 fixaram-se os pontos iniciais e finais (20,20) e (80,80) e alterou-se o tamanho da matriz:

1o teste: Dimensão: 100 x 100

2o teste: Dimensão: 600 x 600

3o teste: Dimensão: 1500 x 1500

Tabela 1. Tempo de cada algoritmo estabelecendo a matriz fixa mas, alterando a origem e o destino.

Algoritmo/Teste	1o	2o	3o
DP	12,18 s	9,98 s	10,13 s
A*	38,02 s	1,86 s	29,66 s
Dijkstra	101,79 s	103,15 s	100,61 s

Tabela 2. Tempo do algoritmo de execução fixaram os pontos iniciais e finais alterando somente os pontos de execução.

Algoritmo/Teste	1o	2o	3o
DP	6,97 ms	0,27 s	1,70 s
A*	11,0 ms	11,6 ms	11,7 ms
Dijkstra	33,1 ms	1,40 s	9,71 s

Podemos concluir que o algoritmo Dijkstra é o mais ineficiente. Além disso, a programação dinâmica é o melhor quando os pontos iniciais e finais estão mais distantes. Caso contrário, o A* é o mais eficiente. De fato, o A* é o único que é realmente sensível à proximidade dos pontos.

Nesta pesquisa desenvolveu-se um programa de geoprocessamento chamado Rota. Este programa possui as seguintes funcionalidades: integração de várias informações espaciais utilizando algoritmos de manipulação de mapas e análise espacial, possui uma interface com o usuário, apresenta uma entrada de dados e faz a integração destes dados, tem como principais funções a consulta, análise espacial, armazenamento e recuperação de dados. Além disso, o Rota também serve como uma ferramenta de suporte ao planejamento de linha de transmissão, que tem como objetivo gerar o traçado de linha de transmissão com o menor custo como pode ser visualizado na figura 1.

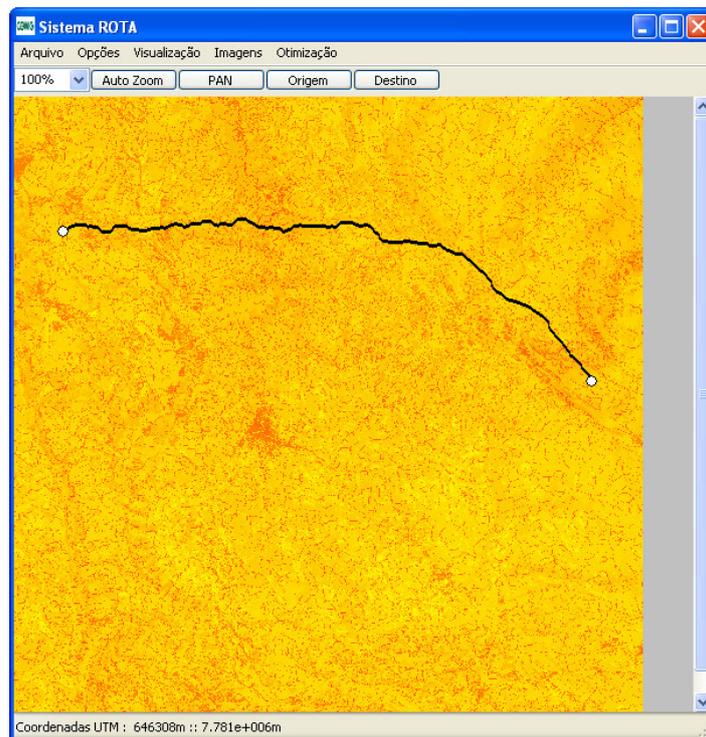


Figura 1. Rota resultado do algoritmo de otimização

5 - Conclusões:

A técnica de *overlay* de mapas foi satisfatória e sua implementação em mapas raster foi extremamente simples. As maiores dificuldades encontradas foram quanto à necessidade de se evitar cópia de dados da imagem na memória interna do computador, já que as imagens possuem um tamanho considerável e esta cópia exigiria um bom tempo de processamento e espaço livre de memória.

Diferentes algoritmos podem propor caminhos diferentes. Entretanto, os diferentes caminhos possuem o mesmo custo total de atravessar o mapa composto, deixando a critério do projetista definir a melhor rota.

Para que o programa possa, de fato, ser utilizado pelas equipes de planejamento, projeto, operação e manutenção de empresas de energia elétrica, é necessário que o estudo espacial seja completo e que uma análise comparativa entre o traçado existente e o proposto pelo programa, em determinada área de estudo previamente definida, seja feita. Com isso, melhorias podem ser propostas e a viabilidade de utilização da ferramenta se torna evidente.

Atualmente, a ferramenta desenvolvida está em fase de avaliação pelos engenheiros da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Nesta etapa novas funcionalidades estão sendo propostas de forma a automatizar atividades que são, atualmente, realizadas de forma manual e também, para cumprir novas exigências de instituições fiscalizadoras. Dentre elas, pode-se citar a geração de um relatório, descrevendo todas as características ou feições geográficas que o traçado da nova linha de transmissão irá atravessar, assim como a distância em quilômetros percorrida.

O estudo feito em diversos softwares SIG, também, nos permitiu propor novas funcionalidades. São funcionalidades de mais baixo nível comparadas ao *overlay* e à rota

ótima, mas que servirão para melhorar a usabilidade e a interface do programa. Dentre elas, pode-se citar o tratamento de resolução das imagens carregadas, já que não é possível realizar o *overlay* com imagens em diferentes resoluções.

Com utilização da ferramenta de geoprocessamento desenvolvida na definição das rotas de linhas aéreas, espera-se elevar a qualidade técnica e, principalmente, operacional dos novos projetos de linhas de transmissão. A aplicação dessa tecnologia em linhas em operação poderá explicitar a condição atual desses projetos em relação à qualidade e confiabilidade remanescente do projeto concebido há vários anos, o que hoje é uma incógnita.

6 - Referência Bibliográfica:

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **Norma NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. Revisão (Draft 04, 17/03/2003). Disponível em <<http://www.cemig.com.br/nbr5422/>>, 2003.
- Berg, M.; Van Kreveld, M.; Overmars, M.; Schwarzkopf, O. **Computational Geometry: Algorithms and Applications**, Second Edition, Springer Verlag, 2000.
- Berry, J. K. **Map Analysis: Procedures and Applications in GIS Modeling**, online book, in preparation. Disponível em <<http://www.innovativegis.com/basis/>>. Acesso em: setembro de 2007.
- Boost, **C++ Libraries**. <Disponível em: <http://www.boost.org/>>. Acesso em: maio de 2008.
- Dijkstra, E. W. **A note on two problems in connection with graphs**, *Numerische Mathematik* 1: 269–271, 1959.
- Labegalini, P. R.; Labegalini, J. A.; Fuchs, R. D.; Almeida, M. T. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. Editora Edgard Blücher Ltda.. São Paulo. 1992. 2.ed. São Paulo: 528p.
- Mata, C. S. ; Mitchell, J. S. B. **A new algorithm for computing shortest paths in weighted planar subdivisions**, *Computational Geometry 97*, Nice, França, 1997, pp. 264-273.
- Monteiro, C. et al. **GIS spatial analysis applied to electric line routing optimization**, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, 934 – 942, 2005.
- UFV, **Introdução ao Spring**. Disponível em: <<http://www.ufv.br/nugeo/pag/curso-spring.htm>> Acesso em: maio de 2007.