



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO VII

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

**PLANEJAMENTO DE ROTAS OTIMIZADAS PARA LINHAS AÉREAS DE ENERGIA
COM USO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL E GEOPROCESSAMENTO**

Carlos Alexandre M. Do Nascimento¹, Adevaldo R. de Souza¹, Renan Taufner Altoe¹

Danilo R. Teófilo², Fabiano L. Belém², Luciano C. A. Pimenta², Mateus M. Bosque² e Renato Cardoso Mesquita².

¹COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS

²UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

RESUMO

Esse trabalho apresenta a ferramenta computacional - Rota para auxiliar o processo de seleção de rotas ótimas e propor melhorias ao processo de planejamento na expansão das linhas aéreas de energia da CEMIG. A plataforma de desenvolvimento permite ser utilizada pela CEMIG, tanto nas fases de planejamento e projeto da expansão. A vantagem de destaque da usabilidade do sistema está na agilidade e na abrangência em obter soluções por meio de imagens georeferenciadas para otimizar o investimento na expansão e também considerar vários vetores ou cenários macroeconômicos para a implantação das linhas aéreas da CEMIG.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização, Planejamento, Otimização, Linha de Transmissão, Rotas de Linhas de Transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

O projeto de uma linha aérea de transmissão envolve uma série de restrições complexas e multidisciplinares (1):

- características elétricas da linha, como nível de tensão, potência a ser transmitida, ampicidade, 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.

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 são 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.

A técnica de "overlay de mapas" (2) 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 podem ser efetuados em cada mapa temático, gerando mapas que combinam custos, qualidade técnica e confiabilidade. A estes mapas são atribuídos pesos dependentes da importância de cada um deles. O "overlay" pode, então, ser efetuado, e sobre seu resultado se aplica um algoritmo de otimização, que determina o corredor ótimo entre o ponto inicial e final da linha, minimizando o custo composto. Mais ainda, a técnica permite efetuar comparações entre os custos relativos de diferentes soluções, que pesam 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 da empresa. E, por outro lado, a aplicação dessa tecnologia em linhas em operação pode 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.

Este é o principal motivador deste projeto: o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que possa ser utilizada pela CEMIG 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. A essa ferramenta foi dado o nome **Rota**. Sob o ponto de vista da empresa, 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. 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.

Este trabalho foi realizado através de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, P&D 160 - Ferramenta para Seleção de Corredor de Linha Aérea de Transmissão Utilizando Inteligência Computacional e Geoprocessamento Aplicada ao Sistema Elétrico, entre a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG e a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (3).

2.0 - O PROGRAMA ROTA

O programa Rota, desenvolvido neste trabalho, utiliza mapas geográficos digitais no formato raster classificados previamente através de um Processamento Digital de Imagem, como mostra a seção 2.1. Após esta etapa, o projetista importa as imagens de interesse para o software Rota e atribui um custo a cada legenda e um peso para cada mapa importado. Realiza-se, então, o overlay dessas imagens com o objetivo gerar um mapa composto, como mostra a seção 2.2. Sobre o mapa composto, determina-se a origem e o destino da rota e através de algoritmos de otimização, chega-se à melhor rota para uma dada configuração, como mostra a seção 2.3.

2.1 - Processamento Digital de Imagens

Antes de utilizar o Programa Rota, é preciso selecionar e processar os mapas das imagens digitais de uma região de interesse. Isto é feito através do Processamento Digital de Imagens (PDI), que é o trabalho que deve ser estabelecido sobre a imagem para a identificação das feições geográficas. O processamento de imagens visa à identificação da maior quantidade de feições geográficas na imagem.

Optou-se por trabalhar com imagens no formato raster, já que pode-se acessar diretamente qualquer posição do mapa por meio de sua estrutura matricial. Isso torna simples o processamento de seus atributos. Além disso, existe um grande acervo de imagens no Brasil neste formato. 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 a resolução maior a quantidade de informação espacial. 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.

O primeiro procedimento a ser realizado no processamento da imagem utilizada neste trabalho é o registro de imagem, que consiste na transformação de uma imagem que está no sistema de linhas e colunas para uma imagem que apresente o sistema geodésico de coordenadas.

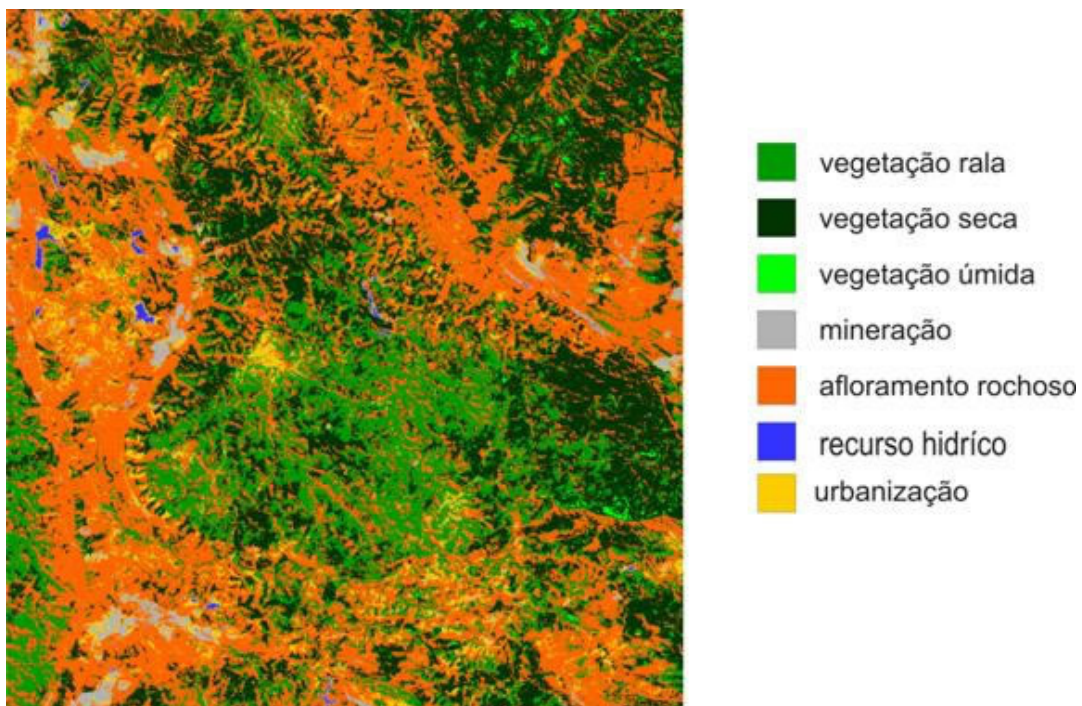
O próximo passo do processamento de imagens é o contraste, que consiste no espalhamento dos pixels dentro de um histograma, ou seja, a representação da variação dos níveis de cinza de uma imagem. Este processo tem como objetivo “clarear” as feições geográficas representadas dentro da imagem.

Outro procedimento utilizado na imagem é a filtragem, que tem como objetivo a remoção de ruídos presentes na imagem. De acordo com a necessidade, diversos tipos de filtros podem ser utilizados. O primeiro filtro a ser utilizado é o de suavização ou filtro passa baixa, visando retirar os ruídos de alta frequência. Após esta etapa, restarão, ainda, alguns ruídos nas bordas da imagem, que devem ser tratados com um filtro de aguçamento e detecção de bordas, ou filtro passa alta. Ele retira os ruídos de baixa frequência e realça os contornos da imagem. Com isso, a imagem torna-se adequada para sofrer a segmentação.

O processo de segmentação da imagem deve ocorrer antes do processo de classificação, pois seu objetivo é tornar o último mais eficiente. Este processo pode ser entendido como uma classificação estatística, constituindo um processo de análise de pixels de forma isolada. Estudaram-se dois tipos de segmentadores: o de detecção de bacias e o de crescimento de regiões. A detecção de bacias é um método de segmentação que ocorre na imagem a partir da variação dos níveis de cinza e é feito das bordas para o interior da imagem. Já o segundo segmentador, utiliza agrupamento de dados, no qual as regiões adjacentes podem ser agrupadas a partir de um teste de similaridade, que é realizado a partir de alguns dados estatísticos (média entre regiões). O segmentador que se mostrou mais adequado à imagem do satélite CBERS¹, após diversos testes, foi o de crescimento de regiões.

O último passo do processamento digital de imagens é a classificação da imagem. Esta pode ser entendida como o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos. Este procedimento visa mapear áreas da superfície terrestre que correspondem aos temas de interesse, ou seja, a separação das feições geográficas presentes na área de estudo.

Um exemplo de imagem classificada pode ser visto na Figura 1.



¹ As imagens raster utilizadas neste trabalho foram do CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) cuja 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 precisa a identificação das feições geográficas relevantes ao planejamento de linha de transmissão.

FIGURA 1 – Imagem classificada

2.2 - Overlay

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 (2). 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.

A composição de mapas com representação raster (utilizada neste projeto) 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:

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

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.

2.3 - Algoritmos de Otimização

As rotas das linhas de transmissão são determinadas por meio da utilização de algoritmos de busca em grafos. Foram estudados os seguintes algoritmos: A* (5), Programação Dinâmica (6), Dijkstra (4). 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 (6), 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.

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. 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.

A escolha do melhor algoritmo depende da configuração. A Tabela 1 apresenta o tempo decorrido para calcular o melhor caminho em diferentes situações no programa Rota. 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)

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

Algoritmo / Teste	1º	2º	3º
DP	12,2 s	10,0 s	10,1 s
A*	38,0 s	1,9 s	29,7 s
Dijkstra	101,8 s	103,4 s	100,6 s

Na 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 2 – Tempo de execução de cada algoritmo fixando os pontos iniciais e finais e alterando o tamanho da matriz.

Algoritmo / Teste	1º	2º	3º
DP	7,0 ms	0,3 s	1,7 s
A*	11,0 ms	11,6 ms	11,7 ms
Dijkstra	33,1 ms	1,4 s	9,7 s

Pode-se 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.

3.0 - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA ROTA

Para mostrar como o programa Rota pode auxiliar no projeto da rota de uma linha aérea de transmissão com extensão de aproximadamente 30 Km considerou-se o seguinte exemplo. A partir de um documento de estudo de um projeto de rota de linha da Cemig na região de Acuruí-MG, selecionaram-se os mapas relevantes: uso e ocupação do solo, estradas e rodovias existentes, vegetação, linhas de transmissão existentes, declividade e altimetria.

Para cada um dos mapas selecionados, foram atribuídas às suas legendas custos: quanto maior o custo de uma região, mais ela deve ser evitada no traçado de uma linha. Foram gerados três mapas compostos onde a presença e os pesos dos mapas de entrada foram diferentes. Em cada um dos três mapas resultantes do overlay, traçou-se uma rota ótima.

No primeiro caso, atribuiu-se a todos os mapas (uso e ocupação do solo, estradas e rodovias existentes, vegetação, linhas de transmissão existentes, declividade e altimetria) o mesmo peso, ou seja, todos tinham a mesma importância. A rota ótima sobre a composição desses mapas aproximou-se da rota projetada pela Cemig apenas na primeira metade do percurso, se distanciando depois, como mostra a Figura 2.

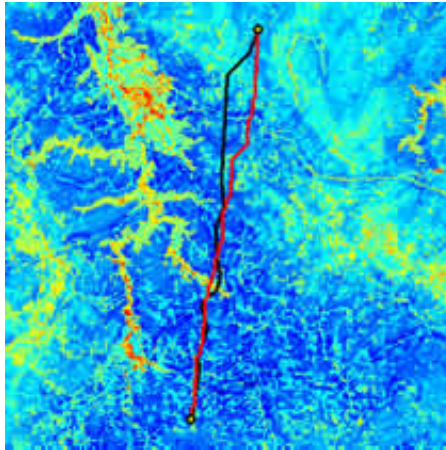


FIGURA 2 – Caso 1 - Rota projetada pela Cemig (preto) e a rota calculada pelo programa (vermelho)

No segundo caso, os mapas de estradas e rodovias existentes, vegetação, linhas de transmissão existentes, e declividade foram utilizados atribuindo peso 3,5 para os três primeiros mapas e peso 4 para o mapa de declividade. A rota ótima sobre o overlay desses mapas praticamente se sobrepôs à rota projetada pela Cemig na primeira metade do percurso, mas, como no primeiro caso, se distanciou no percurso final, como mostra a Figura 3.

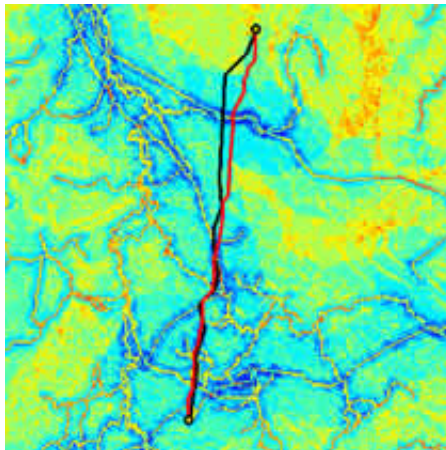


FIGURA 3 – Caso 2 - Rota projetada pela Cemig (preto) e a rota calculada pelo programa (vermelho)

No terceiro caso, o mapa de estradas e rodovias existentes (com um peso 7) e o mapa de declividade (com um peso 11) foram utilizados para gerar o mapa composto, como mostra a Figura 4.

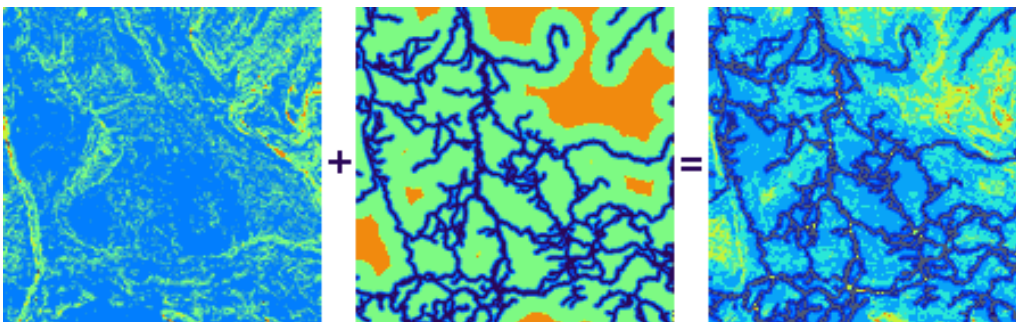


FIGURA 4 – Overlay (à direita) das imagens de declividade (à esquerda) e de estradas e rodovias (ao centro)

No último caso, a linha ótima calculada pelo programa se aproximou da linha projetada pela Cemig durante todo o percurso, como mostra a Figura 5. A maior distância entre as linhas, neste caso, não é superior à 900m. Esta foi, portanto, a configuração que proporcionou um trajeto calculado pelo programa Rota que mais se aproximou da linha projetada pela Cemig. A linha calculada constitui um bom corredor por onde uma linha de transmissão deverá passar.

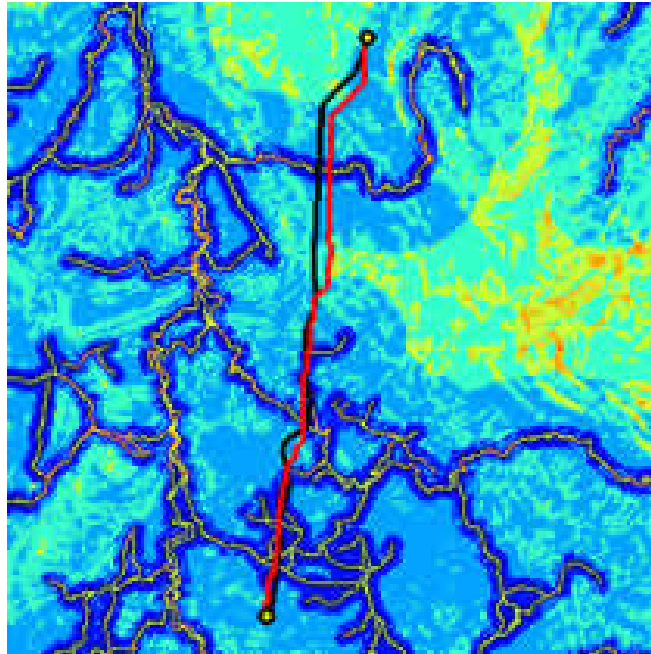


FIGURA 5 – Caso 3 - Rota projetada pela Cemig (preto) e a rota calculada pelo programa (vermelho)

É interessante também mencionar que em um relatório gerado pelo programa Rota é possível obter informações sobre a rota calculada, como por exemplo, para o terceiro caso: a extensão da rota é de 30 Km; durante 28% do trajeto há uma estrada ou rodovia a menos de 300 metros de distância; em menos de 1% do trajeto a distância até uma estrada ou rodovia é superior a 3 Km; a declividade está entre 20º e 30º durante 85% do percurso.

4.0 - CONCLUSÕES

Como resultado final, um sistema computacional ROTA antecipa ao máximo as variáveis críticas sobre as incertezas de análise de planejamento para auxiliar na tomada de decisão, durante o planejamento da expansão das linhas aéreas de energia, o que é altamente recomendável para as empresas do setor de energia. Na fase de planejamento da expansão do sistema elétrico este sistema facilita a análise da variável ambiental em consonância com os aspectos técnicos e econômicos, dentro das alternativas formalizadas. Na fase de projeto será importante na definição da rota recomendável para construção de uma linha aérea de energia, quanto aos aspectos técnicos e ambientais.

Para conseguir resultados satisfatórios utilizando o sistema ROTA é necessário que toda a área em estudo seja mapeada quanto a: uso e ocupação do solo, estradas e rodovias existentes, declividade e altimetria, linhas e subestações existentes, vegetação e unidades de conservação. Outros mapas poderão ser incorporados como temperaturas, descargas atmosféricas, recursos hídricos e áreas inundáveis.

Outras áreas de aplicação no setor elétrico também podem utilizar a base de dados da ferramenta Rota, como por exemplo:

- vetor de busca ótimo que incorpore no processo de planejamento a avaliação e o monitoramento de impactos socioambientais.
- vetor de busca ótimo que incorpore no processo de operação e manutenção o monitoramento a avaliação de regiões críticas das linhas em operação.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1). 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.
- (2). de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, M. and Schwarzkopf, O. *Computational Geometry: Algorithms and Applications*, Springer Verlag, 2000.
- (3). Mesquita, R., and Rodrigues, A., Ferramenta para Seleção de Corredor de Linha Aérea de Transmissão Utilizando Inteligência Computacional e Geoprocessamento Aplicada ao Sistema Elétrico, P&D 160-CEMIG/UFMG/ANEEL, Ciclos 2003/04/05 - 2009.
- (4). Dijkstra, E. W. A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik* 1: 269–271,1959.
- (5). (5) Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4: 100–107, 1968.
- (6). (6) 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.