

# UM ALGORITMO METAHEURÍSTICO DE APOIO À OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE ADUTORAS

*Francisco Jácome Sarmiento<sup>1</sup>*

**RESUMO** – No presente artigo é apresentado um algoritmo metaheurístico de apoio à busca de solução ótima para o traçado de linhas adutoras no espaço. Os custos de passagem segundo cada uma das direções viáveis em um modelo digital de terreno são computados ao longo de triangulações feitas entre o ponto inicial, o ponto de deslocamento em teste e o ponto de entrega final da água. Tanto são considerados os custos associados ao comprimento da tubulação como também os custos de potência. O algoritmo é testado em situação real atípica com vistas a demonstrar sua capacidade em fornecer traçado alternativo não trivial.

**ABSTRACT** – In this paper is presented a meta-heuristic algorithm for support of least-cost path analysis to the routing of pipelines in space. The cost surface of the Digital Elevation Model is computed over triangulations made between the starting point, the point of displacement in the test and the point of final delivery of the water. The costs associated with the length of pipe and the power costs are considered. The algorithm is tested in a real atypical situation in order to demonstrate its ability to provide no trivial alternative route.

**Palavras-chave:** sistemas adutores, otimização de custos.

---

1) Professor da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Campus I, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa – PB. E-mail: jacomesarmiento@hotmail.com.

# 1 - INTRODUÇÃO

A determinação da melhor rota de deslocamento sobre uma área é um dos mais antigos problemas de otimização tratados na literatura especializada. Concernente ao uso de SIG, muitos são os exemplos voltados à busca do caminho ótimo para obras lineares de engenharia tais como oleoduto/gasodutos (HASENACK e WEBER, 1998; YUSOF e BABAN, 2004), estradas/ferrovias (SMITH, 2006), linhas de transmissão (BAGLI, GENELETTI, ORSI, 2010), canais (YILDIRIM, NISANCI e REIS, 2006), etc.

De fato, a otimização prática do traçado de adutoras tem sido mais frequentemente abordada no âmbito do uso de Sistemas de Informações Geográficas – SIG. O procedimento corriqueiro tem sido a deformação do espaço cartesiano, encurtando ou aproximando distâncias de modo a refletir benefícios ou dificuldades em se usar determinados pontos do espaço como passagem para o traçado da tubulação.

No mundo real, a definição do traçado de um sistema adutor respeita determinados condicionantes de várias naturezas: física, econômica, social, política, ambiental e legal. O projetista, considerando as principais variáveis envolvidas, tanto de natureza quantitativa e qualitativa, precisa oferecer a solução mais adequada sem violar as restrições impostas pelas condicionantes referidas.

Do vasto conjunto de condicionantes peculiares às condições de campo onde se pretende implantar o projeto recorrem as seguintes:

- Interferências com infraestrutura implantada (linhas de transmissão, subestações elétricas, estradas, ferrovias, etc.);
- Condições geológicas/geotécnicas, em particular em se tratando de adutoras enterradas;
- Áreas de risco de instabilidade/desmoroamento;
- Rede natural de drenagem;
- Disponibilidade de vias que, durante a construção se prestem como caminho de acesso e, no futuro, à manutenção da adutora;
- Localização planialtimétrica das cidades/comunidades ou pontos de entrega da água;
- Imposições da topografia sobre a definição dos equipamentos eletro- e hidromecânicos a serem empregados na adutora, bem como as implicações sobre os sistemas de proteção contra transientes hidráulicos;
- Uso do solo e necessidade de desvio de áreas ambientalmente restritivas;

Em alguns casos, o número de condicionantes e sua diversidade impõem-se de tal forma que pouca flexibilidade em termos de alternativas resta ao projetista. Assim, uma faixa bem mais estreita de soluções emerge por imposição das restrições.

Nas situações em que as restrições são poucas, o número de alternativas de traçado possíveis para uma adutora destinada à condução da água de um ponto A para um ponto B é imensamente grande e, ainda que uma boa quantidade delas possa ser descartada *a priori*, remanesce o problema da dimensionalidade (número excessivo de alternativas factíveis e necessárias de serem consideradas resultantes das variações de tomada de decisão demandadas a cada passo).

## 2 – O ALGORITMO METAHEURÍSTICO

Levar água de um ponto A para um ponto B via tubulação pressurizada, em termos de traçado, perde em complexidade à medida que a distância entre A e B se torna menor. Para pequenas distâncias, o melhor traçado torna-se trivial e, no limite da simplicidade, é representado no plano cartesiano por uma mera reta ligando o ponto de adução ao ponto de captação.

Para distâncias na escala de quilômetros, caso fosse operacionalmente possível, o procedimento para identificar a rota de transporte consistiria em traçar e quantificar todos os caminhos viáveis de se chegar em B a partir de A, calcular os custos fixos e variáveis associados a cada um deles e escolher a rota cuja soma de custos fosse a menor dentre todas.

Em termos analíticos, problemas de natureza semelhante ao aqui tratado têm geralmente sido analisados por meio de Programação Dinâmica. Para VENTSEL (1983), “a Programação Dinâmica é um método especial de otimização de soluções, especialmente adaptado às operações de múltiplos passos (ou de múltiplas etapas)”.

Uma das maiores dificuldades da aplicação dessa técnica para os problemas reais de sistemas adutores pressurizados, se não a maior delas, é dispor de um “mapa de custo de passagem”, ou seja, de uma quantificação de custos de passagem da adutora por cada ponto da grade de discretização do modelo digital do terreno.

Em muitas dos problemas de roteamento utilizando Programação Dinâmica, os custos de passagem são considerados constantes para cada uma das direções possíveis de deslocamento (anisotropia), mas independentes do caminho percorrido até aquela adjacência, onde se confronta, com base em conveniência econômica, a decisão de passar ou não pelo ponto em teste.

De fato, sendo os custos de passagem constantes, o problema pode ser dividido em etapas, conforme a formulação clássica da Programação Dinâmica. Assim, partindo-se do ponto final para o ponto inicial, são tomadas decisões sucessivas, escolhendo-se a direção de passagem associada ao menor custo. Convertido em grafo, o problema da otimização tem formas computacionalmente muito eficiente de ser resolvido, como por exemplo, o algoritmo de DIJKSTRA (1959).

Qualquer que seja a natureza dos custos de passagem, avançar tomando decisões locais, momentâneas, mas considerando de alguma forma os impactos das mesmas nos passos futuros é o desafio que se apresenta para ser solucionado. Diz-se marcados pelo uso de estratégia “gulosa” os algoritmos que tomam decisão ótima para o momento, sem vislumbre de suas consequências futuras.

Genericamente, o custo total de implantação de uma adutora projetada para levar água de A para B será função dos custos fixos, estes diretamente proporcionais ao comprimento  $l$  da tubulação, e dos custos variáveis, associados à energia elétrica, cujos gastos são proporcionais à potência ( $P$ ) necessária à elevação da água:

$$C_{Total} = f(l, P) \quad (1)$$

Os custos relativos à potência são corriqueiramente obtidos a partir do cálculo das perdas de carga através de uma equação de resistência da forma  $J = \frac{KQ^n}{D^m}$ . Como, por exemplo, a fórmula explícita de Swamee-Jain:

$$J = \frac{0,203Q^2 / gD^5}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2)$$

Onde:

$J$  é a perda de carga unitária (m/m);

$Q$  é vazão aduzida ( $m^3/s$ );

$\varepsilon$  é o coeficiente de rugosidade da parede do tubo;

$R$  é o número de Reynolds;

$D$  é o diâmetro do tubo (m).

A consideração de adicionar custos de naturezas distintas em uma única função (custos fixos e variáveis) pode ser feita de duas maneiras: ou se anualiza os custos de investimento com aquisição dos tubos destinados à adutora ou se converte à parcela relativa aos gastos com energia elétrica em valor presente de capital. Assim, se se deseja que os dispêndios anuais com a adutora sejam o elemento norteador da busca da solução mais econômica para o projeto, a função objetivo a ser posta em investigação será a soma dos custos anualizados de aquisição de tubo (proporcionais ao

comprimento) com os custos afetos à energia elétrica (proporcionais ao número de horas de funcionamento anual e a potência):

$$C_{Total} = C_{tubos} + C_{energia} \quad (3)$$

A conversão dos custos de investimento relativos às tubulações em parcelas anualizadas pode ser explicitada a partir do cálculo do coeficiente  $\alpha$ :

$$\alpha = i \times \left( \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \times c_t \quad (4)$$

Com:

$i$  = taxa anual de juros para cálculo do valor presente da energia elétrica (%);

$n$  = número de anos para cálculo do valor presente da energia elétrica (anos);

$c_t$  = custo unitário da tubulação (R\$/m).

Denominando-se  $\beta$  o coeficiente de proporcionalidade para  $C_{energia}$  e considerando  $e_c$  taxa unitária de energia consumida (R\$/kWh) teremos simplesmente  $\beta = n \times e_c$ .

Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  representam respectivamente as ponderações entre os custos anualizados da tubulação e o custo anual da energia. Assim, na hipótese de tais parcelas, em algum momento dos preços de mercado, coincidirem de ter o mesmo peso no dispêndio anual, teríamos  $\alpha = \beta = 1$ .

O algoritmo proposto, considerando uma triangulação na direção x (horizontal), consiste nos seguintes passos:

- 1) A partir da célula k, calcular os valores da função  $f(l, P)$ , tendo como ponto de destino cada uma das possíveis células da próxima linha (coluna) da grade representativa do modelo numérico do terreno (Figura 1);
- 2) Calcular o valor da função  $f(l, P)$  tendo como ponto de origem cada uma das células da linha (coluna) da grade referida no passo 1 e, como destino, o ponto de entrega da água.
- 3) Adota-se como célula preferencial de avanço aquela que resultar no valor mínimo para a função calculada como a soma dos dois valores obtidos nos passos 1 e 2 (corresponde ao valor da função objetivo).
- 4) A célula preferencial é assumida como sendo a célula k e o procedimento é repetido até se alcançar a célula correspondente ao ponto de entrega da água.

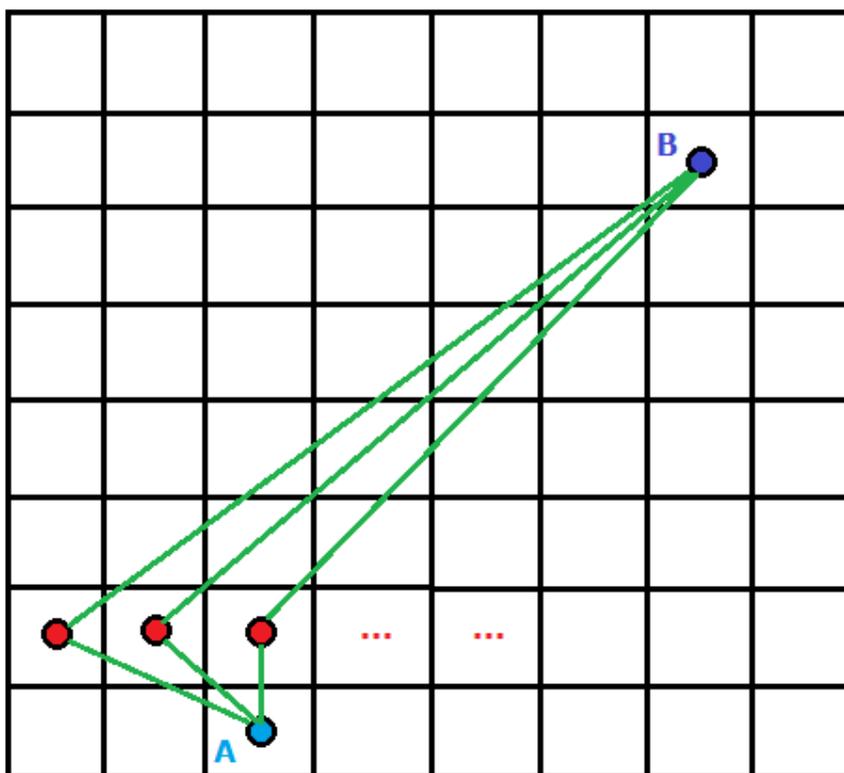


Figura 1 – Esquema de triangulação empregado pelo algoritmo tanto para a direção x como para a direção y.

No cálculo da função referida nos passos 1 e 2, ressaltar-se que a altura manométrica a ser considerada será obtida utilizando-se o máximo desnível a ser vencido na trajetória de triangulação. Assim, há que se ter o cuidado em obter o perfil topográfico de cada triangulação para dele se extrair a cota máxima a ser vencida em se adotando aquela direção. Para cada uma das direções sondadas, a função referida pode ser explicitada na seguinte forma:

$$f(l, P(l, h_g)) = l(\alpha c_t + \beta k J) + \beta k h_g \quad (5)$$

Onde:

$h_g$  = é o desnível geométrico máximo extraído do perfil topográfico relativo à direção sondada, tendo o ponto B como destino (m);

$k$  = é uma constante dada por  $k = \frac{8g}{75\eta}$  ;

$g$  = é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\eta$  = rendimento total do conjunto motor-bomba (%).

A equação (5) é a expressão matemática a qual tem seu valor mapeado no plano x-y. O mapeamento resultante inclui a terceira dimensão (altitude) posto que os custos de elevação da água dependem da variável  $h_g$ , esta, conforme mencionado, é extraída do perfil topográfico associado à direção sondada no plano x-y.

O esquema de triangulação tanto é realizado na direção x (horizontal) como na direção y (vertical), o que possibilita uma varredura completa dos caminhos possíveis, limitada, porém, seu grau de perfectibilidade em captar os matizes da função objetivo adota, pela própria natureza geométrica da sondagem engendrada pelo procedimento descrito.

### 3 – APLICAÇÃO DO ALGORITMO METAHEURÍSTICO

O algoritmo descrito foi aplicado para definição do traçado de uma linha adutora em uma área particularmente complexa em termos de topografia e, conseqüentemente, de tomada de decisão em relação ao caminhar mais econômico para o projeto. Conforme se ver na Figura 2, trata-se de um trecho montanhoso, onde os pontos de captação/adição e de entrega da água situam-se em vertentes opostas, tendo, portanto, forte movimentação de relevo separando os mesmos. Igualmente justifica a escolha da área a inexistência de elementos de infraestrutura ou quaisquer outras restrições que pudessem limitar a liberdade do projetista em termos de traçado da linha.

O ponto de partida (Figura 2) tem coordenadas geográficas  $36,96^\circ$  (Longitude),  $6,30^\circ$  (Latitude) e 249,1 m de altitude. Já o ponto de entrega da água tem coordenadas  $36,86^\circ$  (Longitude),  $6,29^\circ$  (Latitude) e 272,9 m de altitude. A elevação topográfica entre um e outro postos se aproxima de 700m. Em linha reta, os pontos distam cerca de 10,6 km.

Conforme se observa na Figura 2, onde a coloração torna-se mais escura com a altitude, a solução trivial de uma adutora em linha reta implicaria em passagem por uma elevação mais acentuada, aproximadamente à meia distância entre os pontos de captação e entrega (cotas maiores do que 650m, conforme o perfil mostrado na Figura 3).

No primeiro teste, foi considerada a hipótese de  $\alpha = \beta = 1$ , o que implica em um peso igual entre custos associados à tubulação e custo associados à energia elétrica na função objetivo para a qual se busca o ponto de mínimo. Nesse caso, o elevado peso dos custos com tubulação faz com que traçados alternativos que se afastem demasiadamente da solução trivial de distância mais curta (linha reta) sejam fortemente penalizados. Isso faz emergir, tanto na triangulação na direção x como na direção y, traçados que privilegiam as retas e, ao mesmo tempo, se desviam dos pontos de maior elevação topográfica. A Figura 4 mostra uma comparação entre esses traçados. A cota topográfica máxima no perfil resultante do traçado da triangulação em x (linha amarela) é de 328,8m, enquanto

que na direção y é 337,6m, ou seja, 8,8m mais alta, o que torna o traçado representado em amarelo mais atrativo, dado que, em termos de comprimento, ambos os caminhamentos praticamente se equivalem.

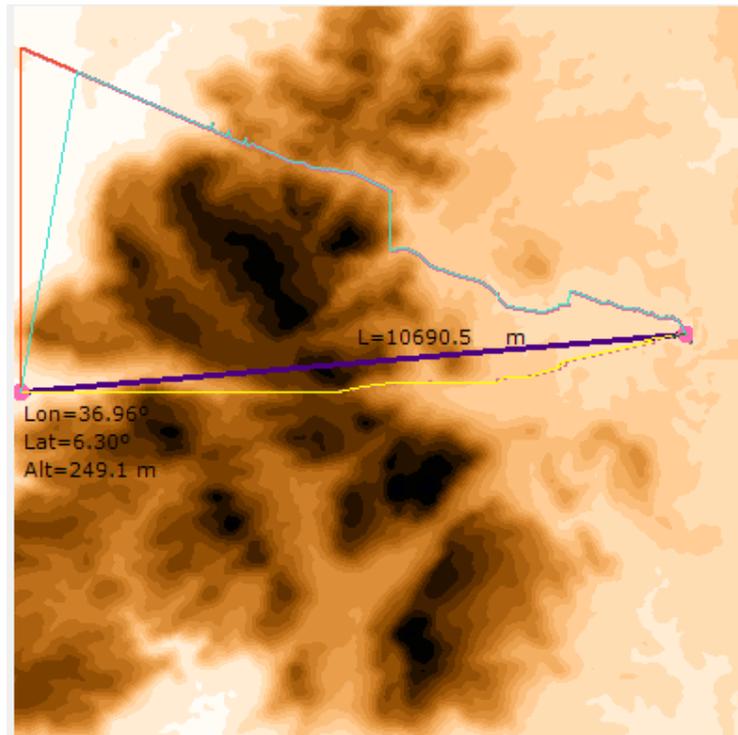


Figura 2 – Relevo e traçados obtidos para o exemplo de aplicação do algoritmo

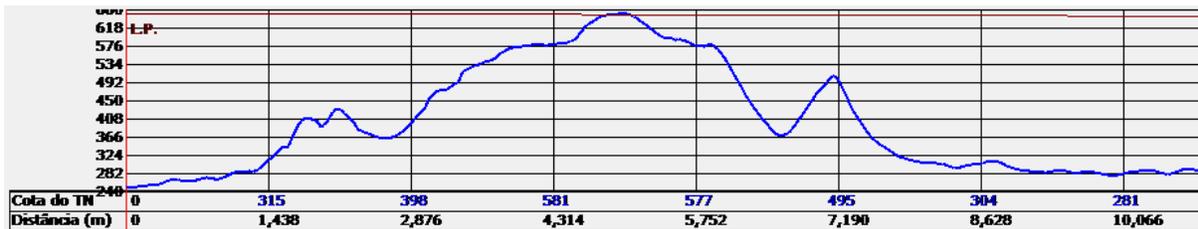


Figura 3 – Perfil topográfico do traçado em linha reta ligando A e B.

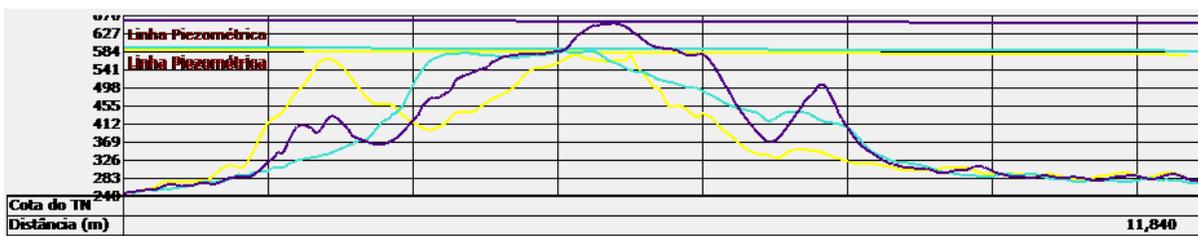


Figura 4 – Perfis comparativos e linhas piezométricas: Adutora reta (azul escuro), adutora da triangulação em x (amarela) e adutora da triangulação em y (magenta).

No segundo teste foram considerados os custos de aquisição de tubulação mostrados na Tabela 1. Trata-se de valores reais obtidos junto a um fabricante de tubos de ferro fundido, classe K7, que apresentou preços em processo licitatório realizado em data relativamente recente.

Tabela 1 – Diâmetros e preços unitários para tubulação em ferro fundido

Diâmetro (mm)	Preço (R\$/m)
150	23,30
200	31,90
250	40,30
300	49,80
350	64,90
400	77,90
450	91,80
500	106,10
600	137,90
700	176,50
800	216,30
900	259,40
1000	306,20
1200	411,90

Os parâmetros agora utilizados estão resumidos na Figura 5. Com os valores apresentados, a relação  $\beta/\alpha = 21,6$  implica na viabilidade econômica de busca de soluções envolvendo bombeamento com alturas manométricas relativamente menores. Isso, em detrimento do comprimento da adutora, posto este precisar ser relativamente mais longo, já que os pontos de captação e de entrega se encontram em vertentes opostas, o que implica na necessidade de se contornar a formação montanhosa.

O traçado resultante obtido com algoritmo proposto é mostrado na Figura 2 na cor magenta. Note que o algoritmo “descobre” uma passagem (uma sela topográfica) onde o desnível máximo é de 246,5m, ou seja, mais de 82 metros a menos do que na alternativa traçada no primeiro teste. Há que se desprezar o segmento formado por linha vertical no traçado mostrado na Figura 2 (cor magenta), posto que o mesmo não é mais do que mero traço de ligação entre o fim de um segmento otimizado e o início do subsequente. No projeto, a união entre tais segmentos seria feita contornando-se o morrote o qual, no perfil mostrado na Figura 6, aparece como determinante da altura geométrica de bombeamento, ou seja, com esse simples ajuste de traçado, a rota “descoberta” tornar-se-á ainda mais econômica.

Parâmetros de dimensionamento da adutora:

Ponto de captação:		Ponto de entrega:		Função Objetivo:	
Latitude:	6.30385 °	Latitude:	6.295232 °	<input type="radio"/> min Z(Potência, Comprimento)	
Longitude:	36.96255 °	Longitude:	36.86369 °	<input checked="" type="radio"/> min Z(Despesa Anual)	
Altitude:	249.125 m	Altitude:	273.004 m	Tubos (c):	22.2
				Energia (C2):	480

Dados do projeto Adutora Integração Brejeira:		Dados sobre o material:	
Vazão de projeto (m³/s):	1	Tipo de material:	D. comerciais:
Diâmetro inicial (mm):	1000	Ferro fundido K7	1000 / 1200
Desnível geométrico na reta (m):	403.3	Diâmetro interno (mm):	1000
Comprimento reto (m):	10690.5	Preço unitário (R\$/m):	306.2
Funcionamento anual (horas/ano):	4800	Rugosidade k:	.03
Rendimento global (%):	80	Fator de atrito (f):	.009
Tempo de retorno do capital (ano):	30	Velocidade (m/s):	1.3
Taxa anual de juros (%):	6	Perda de carga linear (m/m):	.00078
Custo do consumo de energia (R\$/KWh):	.1	Altura manométrica na reta (m):	411.7

Fecha

Figura 5: Parâmetros utilizados no traçado automático (função objetivo: Dispendio Anual)

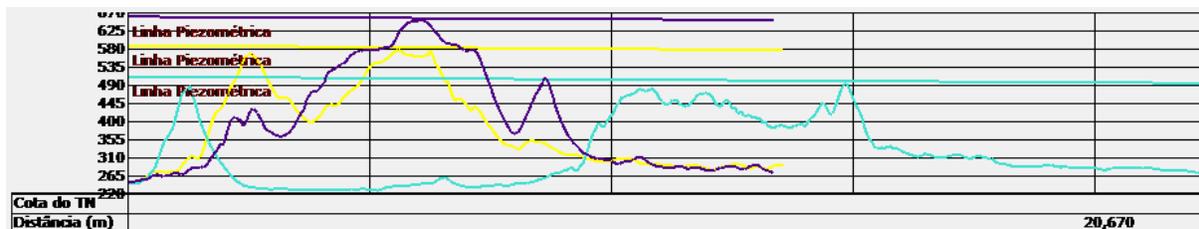


Figura 6: Perfis comparativos e linhas piezométricas: Adutora reta (azul escuro), adutora da triangulação em x (amarela) e adutora da triangulação em y (magenta), com função objetivo Dispendio Anual.

O algoritmo metaheurístico foi codificado em linguagem Visual Basic como parte de um sistema computacional mais amplo denominado HidroProj. Assim, “descoberto” o traçado básico de relevante economicidade, o HidroProj percorre o caminhamento de jusante para montante procurando linearizar o que for possível, ou seja, minimizar o comprimento do traçado da adutora, sem que o valor dos custos com energia elétrica sejam aumentados.

A Figura 7 mostra a representação gráfica da função objetivo do Dispendio Anual utilizada no exemplo em comento. As triangulações realizadas aparecem tanto mais claras quanto mais econômicas são as direções a elas associadas. Conforme se ver na Figura 7 (2), grande parte da área em torno do ponto de entrega da água está inserida em relevo relativamente suave, realidade física que, combinada à sondagem de mínimos da função objetivo feita por triangulação, converte-se no efeito visual de o entorno do ponto de chegada parecer difundir raios, alguns dos quais chegam ao outro extremo (borda da figura). Tais “raios”, em termos topográficos, contêm pontos de interesse na composição de sendas economicamente interessantes prospectadas pelo algoritmo. O mais

econômico dentre eles está assinalado na cor verde no mapeamento da função objetivo (7.1) e em magenta no mapa topográfico (7.2).

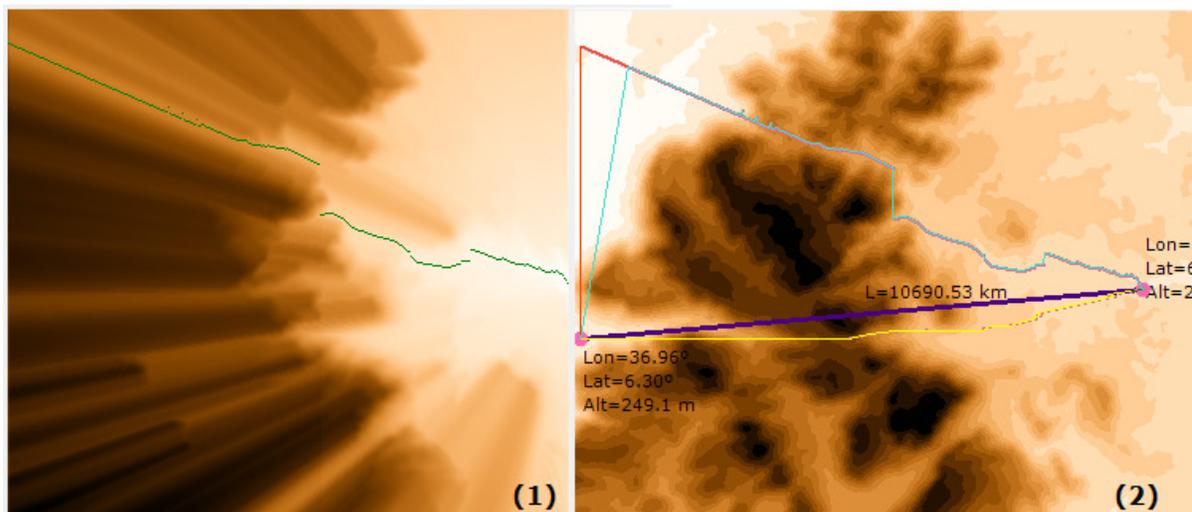


Figura 7: (1) Mapeamento da função objetivo (Dispêndio Anual) com indicação dos vales (verde); (2) Vales (magenta) sobrepostos à topografia.

É evidente a relevância da função objetivo utilizada no processo pelo qual se busca encontrar o caminho de menor custo. Até porque, o “caminho de menor custo” é relativo ao critério sob o qual se tenciona identificar a melhor alternativa de traçado para a adutora. Eleita a função objetivo adequada aos fins perseguidos pelo projeto, dependerá do algoritmo de sondagem a perfectibilidade da representação da superfície formada pelos caminhamentos possíveis que levam de A até B. Cada caminhamento deve ser devidamente quantificado pelo computo do valor da função objetivo em todos os pontos que o compõe, sem deixar de considerar no cálculo a dependência da direção de onde se acessa cada um desses pontos.

Um segundo exemplo de aplicação do algoritmo é mostrado na Figura 8. Os pontos de captação e entrega da água foram escolhidos de forma a interpor duas elevações topográficas entre os mesmos, ficando o ponto de deságue da adutora “encoberto” segundo a direção representada por uma linha reta ligando a captação à entrega.

À esquerda, na figura mencionada, são mostrados os traçados resultantes da triangulação ao longo dos eixos x (amarelo) e y (magenta). Nesse caso a ponderação relativa aos custos dos tubos é idêntica àquela relativa ao custo com energia elétrica. Sob essa condição, ocorre o esperado: em ambas as triangulações, o algoritmo encurta o caminhamento buscando o equilíbrio ótimo entre os custos de investimento com tubos e aqueles advindos do pagamento da energia elétrica.

Os resultados da triangulação em x e y são mostrados na Figura 8 (direita). Note que a relação entre os custos com tubulação e com energia elétrica apresentam proporção de aproximadamente 1:22. Assim sendo, com tubos pesando relativamente menos nos dispêndios

anuais totais, torna-se possível acrescentar um pouco mais o comprimento da adutora para com isso contornar os morros em uma cota mais adequada, de modo que o valor da função objetivo seja o menor dentre os identificados.

Em ambos os casos mostrados na Figura 8, a alternativa mais econômica está representada na cor magenta e advém da triangulação segundo o eixo y. Em termos de desnível geométrico, enquanto o traçado em linha reta cruza desnível geométrico de 182,7m, na rota oriunda da triangulação em x esse valor é de 72,8m, enquanto que a rota mais econômica (triangulação em y) precisa vencer desnível de 71,1m. Este último proporciona a entrega da água com um comprimento mais curto do que sua concorrente mais atrativa. Com isso, além de menor custo com tubulação, tem-se também redução de custos com energia por redução das perdas (visto que o desnível geométrico é praticamente o mesmo). Na Figura 9 são mostrados os perfis topográficos correspondentes a cada uma das rotas.

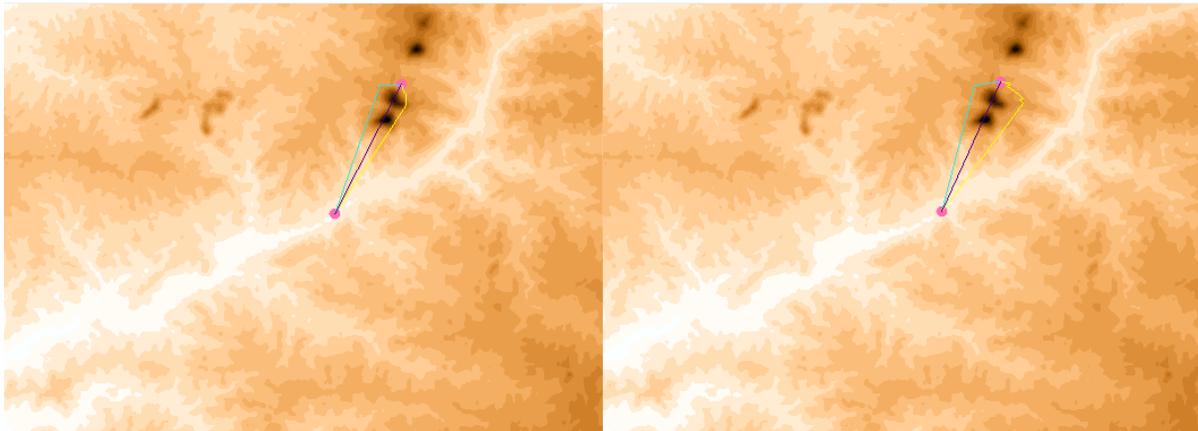


Figura 8: Resultado do algoritmo considerando  $\alpha = \beta = 1$  (esquerda) e com  $\beta/\alpha = 21,6$

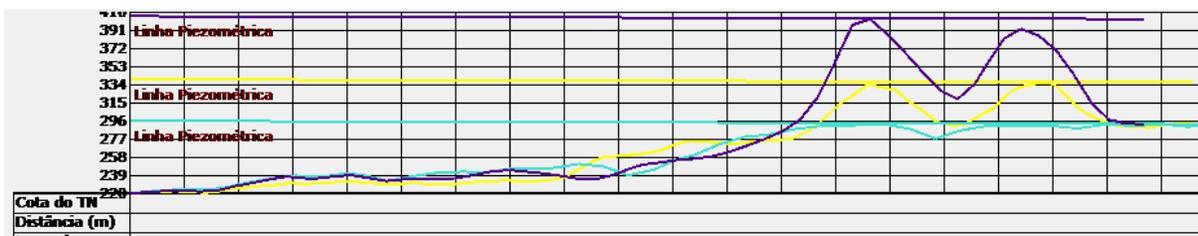


Figura 9: Perfis comparativos e linhas piezométricas: Adutora reta (azul escuro), adutora da triangulação em x (amarela) e adutora da triangulação em y (magenta), com função objetivo Dispendio Anual.

## 4 – CONCLUSÕES

O algoritmo metaheurístico apresentado representa uma alternativa promissora na investigação de traçados econômicos de sistemas adutores. Em particular, seu emprego torna-se

mais atrativo nas situações em que as condicionantes que comumente limitam a flexibilidade do projetista estão ausentes ou são insuficientes para determinarem a rota de implantação da tubulação.

A automatização propiciada permite ao projetista investigar rapidamente alternativas de traçado não triviais, sendo sua utilidade, no que concerne à agilidade, tanto mais relevante quanto mais ampla for a região em estudo. Em um dos exemplos aqui tratados, o algoritmo encontra os caminhos mostrados na Figura 2 - o maior deles com mais de 20 km de comprimento - em tempo inferior a um minuto (desempenho afeto a computador tipo laptop com processador Core – i3).

Da perspectiva das soluções econômicas, há vasto campo investigativo a ser explorado na otimização de sistemas adutores, tanto no que respeita ao seu traçado como ao diâmetro da tubulação. No algoritmo apresentado, parte-se de diâmetro prefixado para a tubulação, embora haja dependência entre essa variável e os custos de potência utilizados na função objetivo do Dispendio Anual, a formulação apresentada elimina o efeito do diâmetro sobre a solução de traçado ótimo, posto que um aumento ou diminuição das perdas de carga implicam tão somente em aumento ou diminuição do valor da função objetivo, sem alterar sua geometria fundamental.

O algoritmo foi formulado para tentar escapar das consequências maléficas da natureza “gulosa” que caracteriza boa parte dos procedimentos disponíveis na literatura, sondando não apenas as células enfileiradas imediatamente a jusante do ponto presente de adução, mas também o perfil de pontos que levam diretamente do ponto sondado ao ponto de entrega da água. Embora tal estratégia não garanta que, também da perspectiva futura, o passo adotado seja o ideal, parte das consequências indesejáveis da “gula” é eliminada.

O fato de a sondagem ser feita por triangulação, esquema geométrico pelo qual o caminho reto entre os pontos testados e o ponto de entrega têm seus perfis extraídos e analisados, privilegia a escolha de trajetos de menor distância no plano cartesiano. Dessa forma, o algoritmo consegue conjugar e extrair soluções plasmadas em ambiente de diálogo matemático entre a minimização dos comprimentos (dimensões  $x$  e  $y$ ) de tubo com a não menos necessária minimização das alturas manométricas (dimensão  $z$ ), isso respeitando a proporção de importância de custos fixos e variáveis traduzida pela relação entre os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ .

Por essa abordagem, os custos de passagem são mapeados apenas segundo a orientação direcional dos dois lados do triângulo formado, a saber: entre o ponto presente e um ponto qualquer da fileira de células imediatamente a jusante (vértice 1) e este e o ponto de entrega da água (vértice 2). Com isso, para além da vantagem da retidão, tem-se o caráter metaheurístico do algoritmo a se evidenciar enquanto forma útil de escape ao problema da dimensionalidade, muitas vezes inelutável, mesmo dispondo dos processadores computacionais mais rápidos.

Entretanto, o atalho metaheurístico adotado para fazer frente ao problema da dimensionalidade tem seu preço: o procedimento geométrico de sondagem proposto captura as feições da função objetivo adotada dentro do limite que lhe é inerente, ou seja, dentro do campo de visão propiciado por sua natureza construtiva (triangulações).

Metaforicamente, pode-se associar a perfectibilidade do mapeamento obtido com determinado algoritmo de sondagem com a maior ou menor resolução de uma câmara fotográfica. No caso do algoritmo proposto, o mapeamento obtido é extraído a partir de sondagens realizadas segundo triangulações lineares, procedimento esse que vem a ser determinante da aparência “irradiante” do mapeamento mostrado na Figura 7(1). Tanto mais complexo e sofisticado o procedimento algorítmico de sondagem, via de regra, mais contínuos e detalhados serão os caminhos viáveis afetos à função objetivo em mapeio. Assim, a “nitidez”, a completude e a continuidade das alternativas possíveis de traçado dependem diretamente da “resolução” propiciada pelo algoritmo utilizado.

Objetivando minimizar a rusticidade do mapeamento metaheuristicamente obtido, o algoritmo proposto procede a triangulação tanto na direção x como na direção y, valendo-se da premissa de que, se não é possível apreender algo de determinado e singular ponto de vista, multiplicar a perspectiva da visada serve à uma aproximação mais realista na reconstituição da paisagem gráfica representativa da função objetivo adotada.

Finalmente, ressalta-se que, se por um lado o algoritmo proposto não garante tomada de decisão globalmente ótima na forma de um traçado econômico único e absoluto - dada a limitação de a sondagem (principalmente para o vértice 2) ser de apenas dois passos e em linha reta - por outro lado, essa mesma sondagem, da maneira como é feita, não subestima a real complexidade do problema. Muito pelo contrário: enfrenta-o diretamente, na forma como o mesmo se apresenta no mundo real, propiciando a identificação, apesar das mencionadas limitações, de trechos de caminhos ótimos da perspectiva do interesse econômico perseguido, este, traduzido pela função objetivo empregada.

## **BIBLIOGRAFIA**

BAGLI, S., GENELETTI, D., ORSI, F. (2010), *Routing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts*, Environmental Impact Assessment Review, Vol 31, pp:234–239, Elsevier Inc.

DIJKSTRA, E.W., (1959). *A note on two problems in connection with graphs*. Numerische Mathematik, 1, 269–271.

HASENACK, H., WEBER, E., (1998), *Análise de Alternativas de Traçado de um Gasoduto Utilizando rotinas de Apoio à Decisão em SIG*. In: GIS Brasil 98, IV Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento, Anais, Curitiba-PR.

SMITH, M., J. (2006), *Determination of Gradient and Curvature Constrained Optimal Paths*, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol:21, pp:24-38, Blackwell Publishing.

VENTSEL, E.S. (1983). *Investigación de operaciones: problemas, principios, metodología*. Moscú: MIR. 280 p.

YILDIRIM, V; NISANCI, R e REIS, S. (2006), *A GIS Based Route Determination in Linear Engineering Structures Information Management (LESIM)*. XXIII FIG Congress, Munich, Germany, [http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps03/ps03\\_11\\_yildirim\\_etal\\_0544.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ps03/ps03_11_yildirim_etal_0544.pdf).

YUSOF, K., W., BABAN, S. (2004), *Least-Cost Pipelines Path to the Langkawi Island, Malaysia Using a Geographical Information System (GIS)*, [www.gisdevelopment.net/application/utility/others/mi04053.htm](http://www.gisdevelopment.net/application/utility/others/mi04053.htm)