

METAHEURÍSTICA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE CANAIS – PARTE I: ASPECTOS TEÓRICOS

Francisco Jácome Sarmiento¹

RESUMO – O presente artigo está dividido em duas partes. Nesta primeira parte são abordados os aspectos teóricos envolvidos no tema. É apresentada a adaptação de um algoritmo usado no campo da inteligência artificial em apoio à busca pelo traçado otimizado de canais. O algoritmo permite definir tanto a rota de menor distância entre dois pontos no espaço plano $x - y$ com obstáculos, como também permite, em sua forma adaptada, a consideração da elevação z , na forma de penalidade influente na definição da rota de menor custo. O algoritmo permite delimitar uma faixa de domínio no interior da qual deve estar contida a solução ótima para o traçado do canal, a qual é buscada com o auxílio de um algoritmo metaheurístico proposto por (Sarmiento e Molinas, 2012).

ABSTRACT – This paper is divided into two parts. In this first part of the theoretical issues involved are presented in the topic. Adaptation of an algorithm used in artificial intelligence in support of the quest for optimized design channel is displayed. The algorithm allows defining both the route of shortest distance between two points in the $x - y$ plane space with obstacles, but also allows, in its adapted form, the consideration of the elevation z in the form of fee influential in defining the least cost route. The algorithm allows to delimit a range within which the field must be within the optimal solution for the layout of the channel, which is pursued with the aid of a metaheuristic algorithm proposed by (Sarmiento and Molinas, 2012).

Palavras - chave: Algoritmo metaheurístico, algoritmo A*, otimização de custos de canais.

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

Dos aquedutos construídos na antiguidade ao suprimento de modernas cidades florescentes em meio ao deserto, os canais hidráulicos vêm sendo utilizados pela humanidade, em particular quando se trata da condução de grandes vazões, cujas magnitudes tornam pouco atrativo ou mesmo técnica e economicamente inviável aduzi-las através de tubulações pressurizadas.

Como é óbvio, vazões crescentes implicam em diâmetros crescentes. Ao se necessitar aduzir vazões que, por exemplo, têm ordem de grandeza de dezenas de m^3/s , os diâmetros das adutoras suficientes a este fim podem se tornar excessivamente grandes, economicamente onerosos e mesmo tecnicamente inviáveis. O problema se agrava quando o transporte hídrico precisa percorrer dezenas ou centenas de quilômetros para alcançar seu ponto de entrega, elevando proporcionalmente os custos envolvidos na implantação dos sistemas de abastecimento.

Genericamente, em situações assim, a opção de engenharia comumente adotada são os canais hidráulicos com seção transversal e declividade compatíveis com a função instrumental a que se destinam. Uma vez tecnicamente admitido como mais atrativo, restará ao projetista definir os detalhes que compatibilizam a concepção hidráulica desse elemento adutor gravitatório com as condições encontradas em campo, sobretudo no que concerne ao caminhamento a ser adotado para o atingimento do ponto de entrega da água a partir da captação, ou seja, a partir do início do trajeto a ser cumprido no transporte.

Sendo canais hidráulicos obras de engenharia cujos custos de implantação, preponderantemente, relacionam-se com itens orçamentários afetos a movimento de terra, vem a ser decisivo para a otimização da solução a escolha de um caminho entre o ponto de partida e o de entrega da água que seja sinuoso o suficiente para conferir suavidade (aderência) do greide ao terreno natural (dimensão altimétrica) sem, por outro lado, incorrer em excessos na dimensão planimétrica. Como resultado de uma combinação inadequada dos elementos de projeto relacionados com as dimensões mencionadas teríamos o alongamento demasiado do trajeto e o comprometimento dos custos totais de implantação da obra. Um bom projeto de engenharia deverá combinar de maneira ótima a observância das dimensões vertical e horizontal, de maneira que o movimento de terra envolvido na implantação da solução seja o menor possível.

A consideração de todas as variáveis envolvidas em um pretenso modelo de otimização de um projeto de adução gravitária dessa natureza é praticamente impossível. Para além dos óbvios procedimentos de terraplenagem executados diretamente ao longo do eixo do canal, haveria que se considerar variáveis representativas da localização, disponibilidade e estratégias de transporte dos materiais terrosos/rochosos extraídos de jazidas; os esquemas operacionais de carga/transporte/descarga que envolvem, muitas vezes, dezenas de máquinas e homens; a dinâmica de destinação dos bota-foras, etc.

Entretanto, é possível lançar mão de uma simplificação que tome em conta tão somente as variáveis influentes nos itens quantitativos do orçamento que sejam mais impactantes para o custo total da implantação, sem negligenciar condicionantes de natureza técnica, econômica, social, ambiental e legal geralmente envolvidos no transporte a ser realizado entre dois pontos do espaço tridimensional. Enfatize-se que, mesmo em sua versão simplificada, o problema posto ainda não dispõe de solução universal que garante a determinação de caminho correspondente a um ótimo global.

No domínio espacial das soluções viáveis, somente em casos raros, o número de condicionantes ou mesmo o poder indutor de solução de uma ou mais delas obriga a adoção de determinada rota para a qual se espera que os custos advindos de sua implantação possam ser absorvidos pela sociedade em face dos benefícios auferíveis (Sarmiento e Molinas, 2012).

No contexto da busca por soluções automatizadas, os computadores vêm proporcionando avanços significativos, minorando a subjetividade outrora dominante na definição de rotas “ótimas” na condução hidráulica, além de permitirem a consideração de elementos infraestruturais e naturais diretamente interferentes no projeto. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) representam a versão clássica das abordagens que têm a informática como principal instrumento na busca de soluções para o problema. Seja deformando o espaço cartesiano para penalizar o deslocamento entre dois pontos, seja arbitrando realisticamente um “custo de passagem” representativo do “esforço” para se mover no espaço tridimensional, os algoritmos sempre precisarão processar milhares de pontos (células discretizadas), que representam o espaço no qual se deve encontrar o caminho de menor custo acumulado.

A limitação do domínio espacial no qual se encontra a solução ótima global tem na redução da quantidade de informação, a ser processada por qualquer que seja o algoritmo, a expressão de sua maior vantagem. Além disso, a determinação matemática de uma faixa dentro da qual se pode garantir que, sob determinadas premissas fundadas na experiência prática, o caminho de menor custo inexoravelmente nela estará contido, representa uma interessante e desejável combinação entre a instrumentalidade prática do uso de modelos matemáticos computacionais com a experiência do projetista, que jamais pode ser desprezada, por mais sofisticado que seja o modelo empregado.

2 – EXPOSIÇÃO DO PROBLEMA

À parte outros condicionantes de diversas naturezas, a busca pela determinação do chamado “caminho ótimo” para um canal de adução tem como principais variáveis de entrada os dados de relevo (cotas altimétricas associadas à latitude e longitude) e a geologia (espessura dos extratos de materiais classificáveis como de 1ª, 2ª e 3ª categorias). Via de regra, essas informações existem na

forma de mapa, configurando a região na qual será feita a pesquisa sobre o melhor caminhamento a ser adotado no desenvolvimento do canal.

Fugindo do lugar comum no qual desembocam grande parte dos problemas relacionados com a determinação do caminho mais curto entre dois pontos no espaço, assinale-se que, no caso dos canais - obras em que a declividade tem sempre o mesmo sinal - os custos de passagem ou de deslocamento de um ponto para outro não são constantes. Para um dado ponto de coordenadas geográficas (x, y) , esses custos são funções que dependem da cota do fundo do canal e esta, por sua vez, dependerá do comprimento do caminho percorrido até se chegar a (x, y) e, claro, da cota com a qual o canal partiu no início do trajeto.

A dependência mencionada acresce em muito a complexidade da solução do problema, a qual é buscada no espaço representado pelo Modelo Digital do Terreno (MDT). A experiência mostra que a função representativa da dependência mencionada atinge um ponto de mínimo para a condição em que o canal é projetado em posição semienterrada (cota do terreno natural próximo à média das cotas do fundo e da berma do canal). Trata-se, portanto, de uma constatação prática que pode ser usada como critério de projeto com vistas a minimizar o movimento de transporte de materiais quando da implantação da obra, pois, atendidos os requisitos de qualidade (índices físicos), o material escavado pode ser empregado na confecção dos aterros das bermas no mesmo trecho, sem a necessidade de serviços de carga, descarga, espera, etc. (Sarmiento e Molinas, 2012).

A lida com essa complexidade envolve sempre o processamento de muita informação, seja de natureza topográfica (matrizes tridimensionais com latitude, longitude e altitude), seja de natureza geológica, como espessuras de camadas de materiais a serem movimentados em cortes e aterros (latitude, longitude e espessuras de camadas de 1ª, 2ª e 3ª categorias).

Por essa razão, é de valia a utilização de procedimento que possibilite restringir o espaço físico de pesquisa do caminho ótimo, garantindo assim uma considerável redução da quantidade de informação a ser manipulada, o que pode viabilizar o emprego de técnicas outras, impensáveis de aplicar ao problema em seu estado inicial, ou seja, sem um domínio mais restrito de busca.

Propõe-se a seguir a combinação entre um algoritmo metaheurístico (Sarmiento e Molinas, 2012) e o algoritmo A* adaptado para obter a solução mais próxima quanto possível do caminho ótimo entre os pontos de captação e adução e o de entrega da água em um problema real.

3 – A COMBINAÇÃO DE ALGORITMOS

3.1 – Algoritmo Metaheurístico

As informações demandadas para a aplicação do algoritmo metaheurístico são a seguir enumeradas. Detalhes e fundamentos da concepção do mesmo podem ser encontrados em Sarmiento e Molinas (2013).

- Modelo digital do terreno com malha retangular cotada a cada 30 m (SRTM depurado pelo INPE);
- Espessura dos estratos geológicos subjacentes: se possível, cobrindo toda a área viável na qual será pesquisado o traçado mais econômico;
- Ponto de partida (adução) e de entrega da água (inclusive cotas de partida e entrega);
- Geometria da seção do canal: refere-se à seção transversal hidráulica (largura do fundo do canal, profundidade total e inclinação dos taludes internos). A seção transversal de projeto (corte, aterro e mista), da qual é parte a seção hidráulica, é considerada em forma paramétrica (Sarmiento, 2008);.

Em sua versão original, o procedimento exigia a delimitação de uma zona do espaço abrangente dos pontos de partida e chegada, dentro da qual o algoritmo podia decidir com liberdade o caminho adotado. Essa tarefa, originariamente realizada de forma manual pelo projetista, será agora realizada matematicamente com base no algoritmo A*, adaptado para essa finalidade.

3.2 – Algoritmo A* para a rota mais curta

Tendo herdado o formalismo do algoritmo proposto por Dijkstra (1959), o algoritmo A* (lê-se “A estrela”) tem sido o mais utilizado na busca de caminhos ótimos no campo da inteligência artificial. Seu emprego popularizou-se, principalmente, no âmbito do desenvolvimento dos jogos eletrônicos, conferindo inteligência artificial aos personagens que, em certas situações virtuais do ambiente lúdico, precisam encontrar o caminho de deslocamento mais curto.

O algoritmo A* tanto pode ser empregado na solução de problemas onde não importa o custo de deslocamento, como também no caso em foco, onde tais custos são dependentes da direção segundo a qual se verifica o movimento. Por essa aptidão, o algoritmo se presta à busca da combinação ótima entre o caminho mais curto e o menor movimento de terra.

Embora tenha flexibilidade para ser aplicado ao espaço contínuo, o algoritmo será utilizado no espaço discreto, representado pela matriz de coordenadas (x, y, z) , obtidas do RSTM acima mencionado. Sendo um algoritmo concebido para trabalhar com grafos, adotaremos o centro geométrico das retículas (células) cotadas do RSTM como coincidentes com os nós de um grafo. Neste, se dará a pesquisa pelo caminho tanto inferior quanto superior da faixa de delimitação da zona de pesquisa do caminho ótimo a ser realizado pelo algoritmo metaheurístico supracitado.

Para fins explicativos, consideraremos uma malha de 10×10 células, espaço em que se necessita determinar o caminho mais curto entre um ponto de partida e um ponto de chegada, contornando obstáculos. As 25 células mostradas na Figura 1 representam um pequeno recorte de dimensões 150 m X 150 m do MDT de interesse.

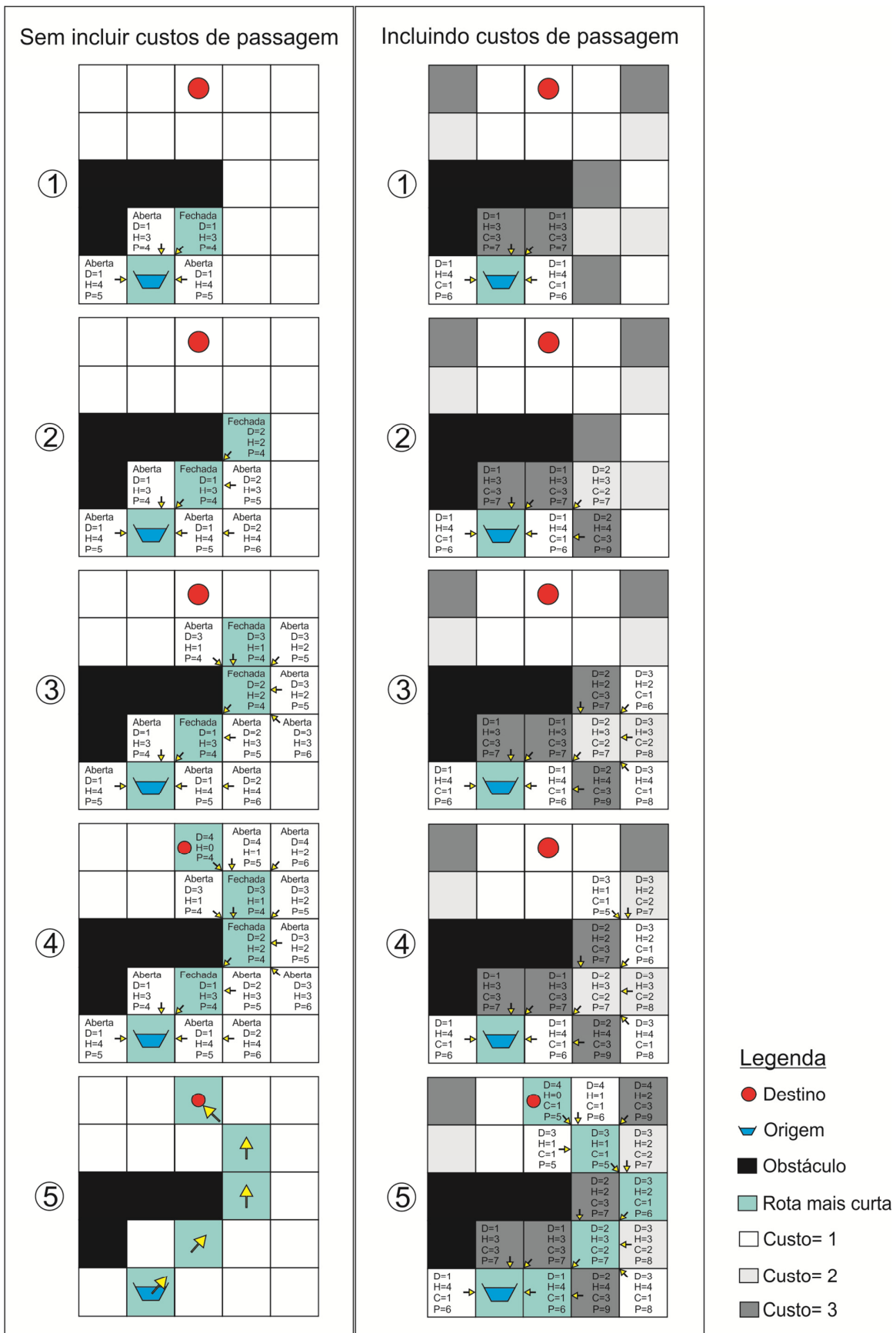


Figura 1 – Passos da evolução do algoritmo A*, sem e com consideração dos custos de passagem.

Na convenção adotada, as células em cor preta são obstáculos a serem evitados no deslocamento entre a célula de origem e o ponto de chegada (célula com círculo vermelho). Células-obstáculos podem ser definidas como sendo aquelas cujas cotas topográficas são muito elevadas ou muito baixas, implicando assim, para um deslocamento através das mesmas, em uma penalização tão grande que dispensa sua consideração, implicando, dessa forma, a admissão das mesmas como obstáculos *a priori*. No projeto do canal, a passagem por tais células indica a necessidade de se realizar cortes excessivamente profundos (cotas elevadas) ou aterros inaceitavelmente elevados (cotas baixas).

A determinação da rota de menor comprimento ou de menor custo exige o conhecimento antecipado de algumas informações. Essa informação é computacionalmente armazenada em duas listas (vetores): uma denominada lista aberta (Open List) e outra chamada lista fechada (Close List). Na lista aberta fica armazenada a identidade das células cuja pertinência em compor o caminho ótimo ainda está em aberto, ou seja, precisa ser revisada pelo algoritmo. No início do processamento, a única célula integrante da lista aberta é aquela correspondente ao ponto de partida do traçado. À medida que avança o deslocamento, novas células irão passando a integrar a lista aberta, conforme veremos adiante.

A lista fechada contém as células já processadas, ou seja, aquelas as quais o algoritmo já percorreu e efetuou os cálculos necessários. O fluxo de células entre as listas se dá da lista aberta para a lista fechada, à medida em que há o deslocamento em busca do ponto de chegada.

Computacionalmente, linguagens como o Visual Basic da plataforma .NET dispõe de uma classe denominada **List**, que permite o armazenamento de elementos indexados, disponibilizando também métodos paramétricos tanto para acrescentar a lista (**Add()**) como para remover (**RemoveAt()**) elementos da mesma.

No processamento do algoritmo, faz-se necessário associar a cada célula uma pontuação (**P**), a partir da qual se fará a seleção do melhor caminho ao objetivo. A pontuação de cada célula resulta da soma de dois valores: (i) o custo desde o início do trajeto até chegar à célula em questão, computado como sendo o número de movimentos para se chegar até o ponto mencionado, referido como **D** e; (ii) a distância denominada heurística, comumente utilizada como sendo a distância entre dois pontos, ou seja, a distância entre a célula que se está processando e o ponto de chegada (diretamente, sem considerar obstáculos), referida como **H**.

Além da pontuação, outra informação se faz necessária. Para cada célula, deveremos ter um apontador que indique a direção da qual adveio o caminhamento para se chegar àquela célula, ou seja, a direção da célula-mãe.

A execução do algoritmo, sem considerar custos de passagens, mas sim a distância mais curta entre a origem e o destino, é descrito de forma enumerada como segue.

- 1) Zerar as listas aberta e fechada;
- 2) Adicionar a célula de partida do trajeto à lista aberta;
- 3) Dentre as células da lista aberta, tomaremos aquela de menor pontuação e a denominaremos célula atual. No primeiro momento de execução do algoritmo há apenas uma célula na lista aberta, logo não há escolha possível e será a célula inicial que será transferida para a lista fechada;
- 4) Em torno da célula atual há oito células vizinhas a serem exploradas. Temos então que verificar se as incluímos ou não na lista aberta. Para isso, há que se testar o atendimento a algumas condições, a saber, (i) se se trata de uma célula-obstáculo (estas nunca integrarão a lista aberta); (ii) se a célula já não se encontre (a) na lista fechada; (iii) se já não se encontra na lista aberta;
- 5) Se a célula sob verificação atende simultaneamente as condições mencionadas no passo anterior, é feito o cálculo da pontuação para agrega-la à lista aberta;
- 6) No estágio inicial do deslocamento mostrado na Figura 1 (Passo 1), o cálculo da distância entre um célula fronteira e o ponto de partida é igual a unidade, para todas as células da lista aberta, posto que as mesmas se encontram a apenas um deslocamento da célula inicial. Já o valor da distância heurística ao ponto de chegada variará de célula para célula. Geralmente, se considera o caminho que, passando pelo menor número de células, leva até a célula-destino. No exemplo, sem considerar os obstáculos, a célula localizada na última linha, coluna 1, terá como pontuação $P = D + H = 1 + 4 = 5$;
- 7) Todas as células integrantes da lista aberta têm como célula-mãe a célula inicial que representa o ponto de partida. Assim, o apontador de cada célula da lista aberta estará indicando àquela célula como origem;
- 8) Seleciona-se agora a célula de menor pontuação. Em caso de empate, tomaremos a primeira com esse ranking que ocorrer na lista, transferindo-a para a lista fechada. Ela será nossa célula atual;
- 9) Repita o procedimento narrado a partir do item 4) com a nova célula atual.

O algoritmo deverá persistir em execução enquanto existirem células na lista aberta e a célula atual não seja a célula-destino. Em se verificando esta segunda condição, a rota mais curta é encontrada seguindo os apontadores das células, desde a célula-destino até a célula inicial. O algoritmo irá encontrar a rota ideal, desde que ela exista. No mundo real, a inexistência de um caminho entre as células inicial e final advém da existência de obstáculos que fecham todas as saídas possíveis pelas quais poderia progredir uma rota entre origem e destino.

3.3 – Algoritmo A* considerando a distância mínima e custos de passagem

Em outras aplicações do algoritmo A* no mundo real, o custo de passagem ou custo de deslocamento entre células pode se referir a tempo, à energia, a combustível ou qualquer outra variável que penalize o movimento de passagem de uma célula para outra. No problema em exame, sabe-se que esses custos são proporcionais à diferença altimétrica entre as células pesquisadas. De maneira que, quanto maior for a diferença de cota entre a célula atual e suas adjacentes integrantes da lista aberta, mais penalizado será o deslocamento entre as mesmas.

Assim, a modificação a ser feita no algoritmo consiste simplesmente em adicionar ao cálculo da pontuação a parcela referente ao custo de deslocamento C , ou seja:

$$P = D + H + C \quad (1)$$

Por óbvio, a eventual preponderância da parcela C na equação acima produzirá caminhos distintos daquele baseado no critério exclusivo de menor distância, posto que a rota agora obtida será mais sinuosa, marcada pela ocorrência de meandros que serão tanto mais frequentes quanto maior for a preponderância da parcela C sobre as demais. Assim sendo, a consideração dos custos traduzidos pela diferença de cota entre células contíguas produz caminhos tendentes a acompanhar as curvas de nível do terreno. No lado direito da Figura 1 são apresentados os passos evolutivos do algoritmo. Por simplicidade adotou-se tão somente três categorias de custos de passagem representados por tons em cinza, conforme legenda constante na figura referida.

4 – CONCLUSÕES

Seja na versão voltada à determinação da rota mais curta, seja na alternativa que possibilita considerar custos de passagem, o algoritmo A* desempenha um papel relevante no projeto otimizado de canais. Quando utilizado para determinar a rota mais curta entre dois pontos no espaço tridimensional, convém estabelecer com precisão os limites inferior e superior das cotas topográficas, a partir das quais o relevo será considerado obstáculo. Identificadas essas regiões, os pontos a elas pertencentes não entrarão no processamento algorítmico.

A forma como o algoritmo A* foi concebido apresenta vantagem adicional de não demandar a pesquisa em todas as células que compõem a região, mas sim apenas nas células que, no decorrer do processo de cômputo, apresentam-se como mais viáveis para compor a rota de deslocamento (mais curta ou menos onerosa) entre os pontos de partida e de chegada. Mesmo quando o algoritmo metaheurístico, eventualmente movido pela “gula”, tenda a perseguir seções em aterro (via de regra mais baratas do que em corte) e com isso venha a tocar o limite da faixa delimitada pelo algoritmo

A* (na qual está contida a melhor rota), avançando paralelamente às bordas da faixa, tem-se a certeza de que, enquanto isso ocorrer, o trajeto percorrido é o da menor distância.

Em sua forma adaptada, o algoritmo A* pode se prestar ao traçado do próprio eixo do canal, desde que seja encontrada uma função adequada para penalizar as decisões locais em relação ao seu impacto na trajetória a ser cumprida entre o ponto em que se encontra o traçado em um dado momento e o ponto de chegada. Esse, aliás, conforme frisado por Sarmento e Molinas (2012), é o principal fator limitante da eficiência do algoritmo metaheurístico proposto no trabalho supracitado. No presente trabalho, a distância simples entre dois pontos ou mesmo a distância denominada Manhattan (caminhamento composto por trechos horizontais e/ou verticais, nunca diagonais), apresentaram eficiência indistinta. Ou seja, nem uma nem outra dão conta de penalizar adequadamente às eventuais inadequabilidades das decisões tomadas localmente, ao se eleger a célula de menor pontuação como preferencial no ingresso na lista fechada.

É reconhecível a vantagem propiciada pelo algoritmo A* em seu uso conjugado com o algoritmo metaheurístico, posto que a busca empreendida por esse último passa a ser restrita à faixa delimitada onde certamente se encontra o traçado ótimo para o canal. Ainda assim, o procedimento de delimitação deve ser criterioso, pois, em algumas situações, uma área tomada como obstáculo pode apresentar estreitamentos onde a implantação de um túnel torna-se economicamente mais atrativa do que contornar o obstáculo. Tais refinamentos precisam ser procedidos após o processamento conjugado dos algoritmos.

Apresenta-se como promissor o uso do algoritmo A* para proceder um mapeamento com o qual seja possível obter uma função de penalização mais refinada para a busca metaheurística. A ideia a ser testada consiste em calcular, para cada ponto inserto na faixa de pesquisa, qual a distância não euclidiana até o ponto de entrega de água. Para isso o próprio algoritmo A* pode ser utilizado tantas vezes quando sejam os pontos testados dentro da faixa mencionada. Tal distância será empregada na função de penalização para decidir a célula mais adequada para integrar o caminho ótimo metaheurístico. O tempo computacional demandado será um dos fatores importantes a ser ponderado no julgamento da adequabilidade e eficácia do procedimento sugerido.

BIBLIOGRAFIA

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

SARMENTO, F. J. (2008). *Otimização de Custos de Adução na Transposição do Rio São Francisco*. IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador – BA.

SARMENTO, F. J., MOLINAS, P.A. (2012); *Um Algoritmo Metaheurístico De Otimização Do Traçado De Canais*, XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa - PB.