



OPTIMIZATION OF WATER PUMPING POWER WITH ANT COLONY

Thiago Ribeiro de Alencar

ribeiro.alencar@gmail.com

Universidade Federal do ABC (UFABC)

Av. dos Estados, 5001, Zip-Code 09210-580, Sao Paulo, Brazil

Jacyro Gramulia Junior

jacyrogramulia@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)

Rua Pedro Vicente, 625, Zip-Code 01109-010, Sao Paulo, Brazil

Patricia Teixeira Leite Asano

patricia.leite@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC (UFABC)

Av. dos Estados, 5001, Zip-Code 09210-580, Sao Paulo, Brazil

Abstract. *This article intends to present an application of the MMAS (MAX-MIN Ant System) algorithm with georeferenced relief data to optimize the pumping power between two points defined by the user. The algorithm was applied in three case studies with three bridges linking the origin to the transfer destination. In addition, the case studies consider areas of environmental preservation. The program was developed in Java and presented adequate results because the minimizing the pumping power with smooth relief profile to facilitate the construction of the pipe.*

Keywords: *Ant Colony, MAX-MIN Ant System, pumping power, optimation and geoprocessing*

I. INTRODUÇÃO

Como todas as buscas baseadas em algoritmos, a vantagem significativa dos algoritmos ACO (Ant Colony Optimazation) na operação do reservatório é sua capacidade de estar diretamente ligada a qualquer modelo de simulação de sistema completo e detalhado. Os algoritmos ACO são bastante robustos para resolver problemas altamente não-lineares e não-globais.

A primeira aplicação do algoritmo ACO básico na operação do reservatório para o planejamento da geração hidrelétrica foi apresentado por Huang (2001) para um período de 24 horas. Em artigos subsequentes, Jalali et al. (2006a, b) apresentaram versões melhoradas do algoritmo ACO clássico para operação de reservatório único e múltiplo. Eles introduziram formigas exploradoras, reinicialização de feromônio e uma substituição de caminho parcial para melhorar o desempenho do algoritmo ACO padrão. Em uma tentativa simultânea, Kumar e Reddy (2006) fizeram políticas operacionais derivadas para um sistema de reservatório multiuso por meio do algoritmo ACO.

Não foram relatadas muitas aplicações de algoritmos de formigas que beneficiam eficientemente do conceito de função heurística na formulação. De fato, a exploração direta da informação heurística tem sido frequentemente negligenciada devido a dificuldades de formulação. Apenas alguns artigos empregaram explícita ou implicitamente a informação heurística na definição de pontos de decisão e espaço de busca (Afshar e Moeini 2008; Moeini e Afshar 2009, 2011; Guo e Wang, 2010).

As redes de distribuição de água (WDNs - Water Distribution Networks) são conhecidas como problemas não lineares, restritos e multimodais. O primeiro uso de ACO na otimização WDN pode ser atribuído a Simpson et al. (2001) e Maier et al. (2001, 2003). Eles aplicaram o algoritmo ACO para o projeto ideal de uma rede pequena com 14 tubos, dois reservatórios e três loops. Seu foco foi ilustrar a aplicação da ACO no projeto da WDN e investigar a sensibilidade ao desempenho do método ACO para mudanças nos parâmetros ajustáveis. Em um trabalho mais abrangente, Maier et al. (2003) apresentou uma abordagem generalizada para o projeto ideal das WDNs.

Em uma série de trabalhos, a Zecchin em conjunto com outros pesquisadores aplicaram diferentes versões de algoritmos ACO e testaram suas performances no projeto de sistemas de distribuição de água com várias topologias (Zecchin et al., 2003; 2005; 2006; Zecchin et al., 2007a, b). O desempenho do MMAS (Max-Min Ant System) foi comparado com o de AS (Ant System) para dois estudos de caso WDS de uso comum, sendo esses o Problema de Túnel de Nova York e o Problema de Hanói (Zecchin et al., 2006). Neste estudo, o MMAS superou a AS.

O uso da computação evolutiva no projeto ótimo do esgoto é bastante antigo, a aplicação do ACO nesta área tem origem recente. Um procedimento de refinamento adaptativo foi proposto pelo Afshar (2006a) para restaurar a eficiência computacional do algoritmo ACO aplicado ao projeto da rede de esgoto. No trabalho de Afshar (2006a) foi discutido como o nível de discretização do espaço de busca contínuo pode levar a soluções finais indesejáveis e /ou ampliar a escala do problema e custo computacional. Em um artigo subsequente (Afshar 2007b), dois algoritmos ACO parcialmente restritos foram formulados e aplicados com sucesso no projeto da rede de águas pluviais. O método fornece uma lista de tabu para cada formiga em cada ponto de decisão para satisfazer algumas das restrições no

processo de construção da solução.

Os problemas de gerenciamento de águas subterrâneas são muitas vezes muito complexos porque são de natureza altamente não linear com um domínio de decisão discreto e/ou descontínuo e um modelo de simulação numérica computacionalmente caro. Os problemas de otimização de águas subterrâneas podem incluir gerenciamento de aquíferos de águas subterrâneas, monitoramento de projeto de rede, estimação de parâmetros de aquíferos, identificação de fontes de poluição e remediação de águas subterrâneas. Embora, pareça ser bastante adequado para todas as classes de gerenciamento de águas subterrâneas, os algoritmos ACO não foram amplamente utilizados em problemas de gerenciamento de águas subterrâneas. No entanto, a aplicação de algoritmos ACO na gestão das águas subterrâneas tem recebido cada vez mais atenção. Uma das primeiras aplicações do ACO em recursos hídricos utiliza um procedimento de modelagem inversa para estimar os parâmetros hidráulicos do solo não saturado (Abbaspour et al., 2001). Usando o ACO, em uma série de trabalhos, Li em conjunto com outros pesquisadores abordaram diferentes aspectos dos planos de monitoramento de longo prazo da água subterrânea (Hilton et al., 2005, Li e Hilton, 2007).

A aplicação mais recente e interessante de ACO na gestão de bacias hidrográficas foi relatada por Emami Skardi et al. (2013). Esses pesquisadores combinaram o modelo de simulação de bacia hidrográfica da ferramenta de avaliação de água do solo (SWAT - Soil Water Assessment Tool) com um módulo de otimização de colônias de formigas e a abordagem da teoria cooperativa de jogos para derivar a estratégia ideal para gerenciamento de bacia hidrográfica.

Conforme apresentado anteriormente os algoritmos de colônia de formigas vem sendo aplicados na área de gestão de águas nos últimos anos em diversos seguimentos, destacando-se operação de reservatório e gerenciamento de águas superficiais; sistemas de distribuição de água; engenharia de drenagem e águas residuais; sistemas de águas subterrâneas e por último problemas de gerenciamento de águas subterrâneas.

Não se encontrou na literatura trabalhos aplicando ACO em conjunto com ferramentas de geoprocessamento aplicados na otimização da potência de bombeamento. Portanto, esse artigo pretende apresentar uma aplicação com o algoritmo MMAS (MAX-MIN Ant System) com dados de relevo e áreas de preservação ambiental proveniente de programas de geoprocessamento para otimizar a potência de bombeamento entre dois pontos definidos pelo usuário no espaço de busca.

II. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo de elevação e dados de relevo utilizados neste artigo foram obtidos a partir do programa TOPODATA (disponível em <http://www.dsr.inpe.br/topodata>) desenvolvido pelo INPE (Valeriano e Rossetti, 2011). Os dados do projeto dados do projeto TOPODATA/INPE cobre o território brasileiro, derivados de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission ou Missão Topográfica Radar Shuttle), com resolução espacial melhorada para 30 metros.

Primeiramente, os dados coletados através da aquisição das alturas (coordenada Z) do relevo da região em análise de acordo com a constante de discretização D fornecida pelo usuário são alocados em uma matriz onde a coordenada Y representa a posições discretas das latitude e X das longitudes.

Neste artigo foi utilizado o program QGIS para realizar o tratamento dos dados e discretização do relevo que será utilizado como espaço de busca para a otimização de colônia de formigas. Após a realização da discretização no QGIS, os dados forma exportados em formtado CSV. Esses dados formam utilizados como dados de entrada para o programa desenvolvido na linguagem Java e realização da otimização externa ao programa de geoprocessamento do caminho com menor potência de bombeamento entre dois pontos definidos pelo usuário.

Primeiramente, os dados coletados através da aquisição das alturas (coordenada Z) do relevo da região em análise de acordo com a constante de discretização D fornecida pelo usuário são alocados em uma matriz onde a coordenada Y representa a posições discretas das latitude e X das longitudes, conforme apresentado na figura 1.

Matriz Global de Relevo (m)					
	X1	X2	X3	X4	X5
Y1	-1	-1	-1	-1	-1
Y2	-1	889,819	891,749	893,354	-1
Y3	-1	892,425	893,752	895,879	-1
Y4	-1	900,854	901,126	902,884	-1
Y5	-1	-1	-1	-1	-1

Figura 1: Exemplo de matriz do espaço de busca da solução

As alturas da matriz da figura 1 serão os caminhos por onde os agente (formigas) percorrerão em busca das melhores soluções. A figura 1 mostra o formato da matriz por onde serão criados os caminhos. O ambiente é completado com a leitura das áreas de preservação ambiental de programas de geoprocessamento da área d estudo, conforme apresentado na figura 2.

Matriz Ambiental					
	X1	X2	X3	X4	X5
Y1	-1	-1	-1	-1	-1
Y2	-1	0	0	-20	-1
Y3	-1	0	0	0	-1
Y4	-1	0	0	0	-1
Y5	-1	-1	-1	-1	-1

Figura 2: Exemplo de matriz global ambiental

Além disso, o usuário define o ponto de partida (nicho = 10) e destino (comida = 30) dentro do espaço de busca da matriz global ninheo e comida.

	X1	X2	X3	X4	X5
Y1	-1	-1	-1	-1	-1
Y2	-1	10	0	0	-1
Y3	-1	0	0	0	-1
Y4	-1	0	0	30	-1
Y5	-1	-1	-1	-1	-1

Figura 3: Exemplo de matriz global do ninho e comida

Com esses dados são criados mais 3 matrizes globais, sendo:

- Matriz global: exclusão (figura 4)
- Matriz global: lugares visitados (figura 5)
- Matriz global: feromônio

A matriz de exclusão é composta por:

- Áreas de preservação ambiental (cor verde e valores -20)
- Condição de contorno delimitadora do espaço de busca (cor amarela e valores -1)
- Último lugar visitado pela formiga (agente não pode voltar para o lugar do passo anterior)

Matriz Global: Exclusão

	X1	X2	X3	X4	X5
Y1	-1	-1	-1	-1	-1
Y2	-1	0	0	-20	-1
Y3	-1	0	0	0	-1
Y4	-1	0	0	0	-1
Y5	-1	-1	-1	-1	-1

Figura 4: Exemplo de matriz global exclusão

A matriz global (lugares visitados) é inicializada com o valor 1 em todo o espaço de busca.

Matriz Global de Lugares Visitados

	X1	X2	X3	X4	X5
Y1	-1	-1	-1	-1	-1
Y2	-1	1	1	1	-1
Y3	-1	1	1	1	-1
Y4	-1	1	1	1	-1
Y5	-1	-1	-1	-1	-1

Figura 5: Exemplo de matriz do espaço de busca da solução

As alturas da matriz da figura 1 serão os caminhos por onde os agente (formigas) percorrerão em busca das melhores soluções.

Considere-se que a formiga encontra-se no ponto ${}_0C^0$ e possa se mover nas direções paralelas aos eixos Y, X ou na diagonal do retângulo. Portanto, pode-se representar esses 3 movimentos da formiga através da representação da figura 6.

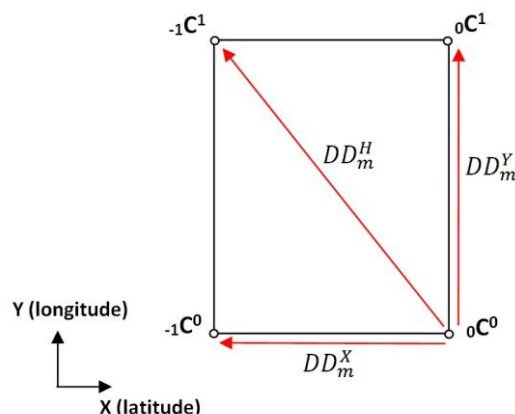


Figura 6: Direções possíveis para o caminho da formiga

O valor de L, pode ser calculado pela equação 1.

$$L = \begin{cases} DD_m^x & \text{movimento na direção x} \\ DD_m^y & \text{movimento na direção y} \\ \sqrt{(DD_m^x)^2 + (DD_m^y)^2} & \text{movimento na direção diagonal} \end{cases} \quad (1)$$

Portanto, a potência de bombeamento pode ser calculada pela equação 2.

$$\begin{cases} P_B = \frac{\gamma \cdot Q}{\lambda} \cdot \left[z_2 - z_1 + \left(f \frac{8}{\pi^2 \cdot g \cdot k^5 \sqrt{Q}} \right) \cdot L \right] & \text{para } z_2 \geq z_1 \\ P_B = \frac{\gamma \cdot Q}{\lambda} \cdot \left[\left(f \frac{8}{\pi^2 \cdot g \cdot k^5 \sqrt{Q}} \right) \cdot L \right] & \text{para } z_2 < z_1 \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

P_B = potência de bombeamento do sistema (W)

λ = rendimento da bomba (%)

Q = vazão do líquido a ser bombeado (m^3/s)

L = distância da tubulação do ponto 2 até 1 (m)

z_2 = relevo do ponto 2 ou próximo ponto da formiga (m)

z_1 = relevo do ponto 1 ou ponto atual da formiga (m)

γ = peso específico do líquido (N/m)

g = aceleração da gravidade (m^2/s)

k = coeficiente de Bresse

f = fator de atrito da tubulação

Sendo possível assim calcular a potência de bombeamento (P_B) do sistema conhecendo-se a aceleração da gravidade (g), peso específico do líquido (γ), rendimento da bomba (λ), vazão líquido a ser bombeado (Q), a distância L da tubulação, diferença de altura entre os pontos z_2 e z_1 , além do coeficiente de Bresse (k) tabelado de custo de investimento versus custo operacional de acordo com o tipo de tubulação.

A função objetivo (FO_{P_b}) de minimização da potência de bombeamento pela colônia de formiga utilizada para avaliar o melhor caminho de transferência utilizado neste trabalho esta apresentado na equação 3.

$$\text{Min } FO_{P_b} = \frac{\gamma \cdot Q}{\lambda} \sum_{s=1}^{ST-1} \left[z_{s+1} - z_s + \left(f \frac{8}{\pi^2 \cdot g \cdot k^5 \sqrt{Q}} \right) \cdot L_{s+1} \right] \text{ sendo } \begin{cases} z_{s+1} - z_s > 0, \text{ para } z_{s+1} \geq z_s \\ z_{s+1} - z_s = 0, \text{ para } z_{s+1} < z_s \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

FO_{P_b} = função objetivo da formiga

ST = número total de passos da formiga na solução

s = posição atual da formiga no espaço de busca

A função objetivo apresentada na equação 3 pode ser dividida em 2 somatórios, conforme apresentado na equação 4.

$$FO_{P_b} = \frac{\gamma \cdot Q}{\lambda} \sum_s^{ST-1} (z_{s+1} - z_s) + \frac{\gamma \cdot Q}{\lambda} \left(f \frac{8}{\pi^2 \cdot g \cdot k^5 \sqrt{Q}} \right) \sum_s^{ST-1} L_{s+1} \quad (4)$$

Sendo:

$$FO_{P_b}^1 = \frac{\gamma \cdot Q}{\lambda} \sum_s^{ST-1} (z_{s+1} - z_s) \quad (5)$$

$$FO_{P_b}^2 = \frac{\gamma \cdot Q}{\lambda} \left(f \frac{8}{\pi^2 \cdot g \cdot k^5 \sqrt{Q}} \right) \sum_s^{ST-1} L_{s+1} \quad (6)$$

Portanto, a otimização da minização da potência de bombeamento através da colônia de formigas depende de duas variáveis de decisão, sendo a primeira ($FO_{P_b}^1$) depende da somatória dos relevos a serem superados pelo bombeamento da transferência para todos os passos da formiga. A segunda parcela ($FO_{P_b}^2$) que depende da somatória parcela linear da distância para todos os passos da formiga do ninho até a comida da formiga.

A primeira parcela ($FO_{P_b}^1$) da função objetivo transmite o conhecimento para a colônia de formiga que pretende-se evitar oscilações com subidas e descidas desnecessárias na construção das tubulações de transferência a ser encontrado no perfil de relevo. Por outro lado, a segunda parte ($FO_{P_b}^2$) transmite o conhecimento que pretende-se também encontrar o perfil de relevo com o menor caminho linear possível. Por tanto, as duas parcelas $FO_{P_b}^1$ e $FO_{P_b}^2$ modelam o problema como uma minização das variáveis (variação do relevo e distância linear da tubulação) que influenciam na potência de bombeamento P_B .

Para tubulações de sucção de bombas o coeficiente de Bresse (k) adotado encontra-se entre 0,8 e 1,6. Neste trabalho será adotado o meio da faixa do coeficiente de Bresse, ou seja, valor de 1,2 para k. Além disso, serão considerados os seguintes valores para as variáveis do problema:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \\ g = 9,8 \text{ m/s}^2 \\ \gamma = 9800 \text{ N/m} \\ \mu = 1,558 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}^2 \\ k = 1,2 \\ \lambda = 0,6 \text{ (60\%)} \\ Q = 1 \text{ m}^3/\text{s} \end{array} \right.$$

III. MAX-MIN ANT SYSTEM

O algoritmo de colônia utilizado nesta pesquisa será o MAX-MIN Ant System.

III.A. FORMIGA NO MODO FORWARD (IDA)

A cada nó, ou ponto referente a altura do relevo, a formiga artificial executa uma função com características também estocástica para calcular a probabilidade de utilização do caminho.

No caso do problema da construção da tubulação de transferência os agentes, formigas, seguirão caminhos similares da formulação original proposta por Dorigo et al., (1996) na busca da solução, entretando ao invés de serem consideradas as distâncias serão adotados os melhores resultados para a potência de bombeamento.

Na fase de construção da solução do problema, no começo do algoritmo, todos os trechos do sistema de distribuição têm a mesma quantidade de feromônio. Então, a formiga parte da origem da transferência e escolhe o ponto seguinte de relevo a ser visitado com uma probabilidade que é uma função do inverso da potência de bombeamento, inverno número de vezes visitadas no ponto e da quantidade de feromônio presente no trecho que liga a ponto do relevo atual onde esta a formiga com os outros pontos de relevos ainda não visitadas que não façam parte de áreas de preservação. A formiga decidirá para onde continuará caminhando realizando uma seleção aleatória. Os pontos de relevo com maior probabilidade terão mais chances de serem escolhidos. Para não permitir passos inválidos, as formigas artificiais possuem memória das informações dos trechos já visitados. Assim, ao mesmo tempo em que a formiga constrói a configuração do caminho do perfil de bombeamento, ela tem menor probabilidade de visitar um mesmo ponto do espaço de busca mais de uma vez, até encontrar um perfil de bombeamento completo.

A equação 8 a seguir apresenta a probabilidade k em uma posição i para o agente artificial (formiga) escolher os pontos adjacentes da posição atual, conforme descrito anteriormente.

$$P_k(i, j) = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)]^\alpha \cdot [\eta(i, j)]^\beta \cdot \left[\frac{1}{\omega(i, j)}\right]^\gamma}{\sum_{\mu \in M_k} [\tau(i, \mu)]^\alpha \cdot [\eta(i, \mu)]^\beta \cdot \left[\frac{1}{\omega(i, \mu)}\right]^\gamma} & \text{se } j \in M_k \\ 0 & \text{se } j \notin M_k \end{cases} \quad (8)$$

Onde:

k : agente ou formiga em análise

$P_k(i, j)$: probabilidade do agente k visitar o ponto do relevo j a partir do ponto de relevo i .

$\tau(i, j)$: feromônio sobre determinado caminho com origem i e destino j .

$\eta(i, j)$: inverso da potência de bombeamento P do caminho com origem i e destino j .

$\omega(i, j)$: número de vezes visitas do agente k no destino j .

α : parâmetro que determina a importância relativa do feromônio.

β : parâmetro que determina a importância relativa do inverso da potência de bombeamento P .

γ : parâmetro que determina a importância relativa do parâmetro referente ao inverso do número de lugares visitados.

M_k : conjunto de pontos vizinhos de i que não fazem parte de áreas de exclusão.

μ : destino do ponto atual i que faz parte do conjunto M_k .

i : altura em metros do relevo no ponto atual (x_i, y_i) .

j : altura em metros do relevo do próximo ponto (x_j, y_j) de destino na vizinhança de i que faz parte do conjunto M_k .

x_i : coordenada x da latitude do ponto atual i .

y_i : coordenada y da longitude do ponto atual i .

x_j : coordenada x da latitude do próximo ponto de destino j .

y_j : coordenada y da longitude do próximo ponto de destino j.

A divisão pelo somatório dos valores do numerador caracteriza a normalização da equação ou o percentual para tomada de decisão.

Cada ponto do espaço de busca da formiga possui 8 vizinhos. Considere que a formiga se encontra na posição (X2, Y2) do exemplo da figura 1, portanto a matriz local de posições pode ser representado pela figura. 7. Na matriz local de posições da figura 7 o número 0 em vermelho representa a posição atual formiga e os número de 1 até 8 a ordem dos vizinhos da posição (X2, Y2).

Matriz Local: Posições			
	X1	X2	X3
Y1	2	3	4
Y2	1	0	5
Y3	8	7	6

Figura 7. Exemplo de matriz local de posições do ponto (X2, Y2)

As áreas de preservação ambiental (verde com valor -20), condições de contorno (amarelo com valor -1) e último ponto vistado (roxo com valor -10) são evitadas através da matriz local de exclusão. Considere que a formiga saiu do ponto i (X2,Y2) para o ponto j (X3, Y3). Portanto, a nova matriz local de posição passa a ser representada pela figura 8.

Matriz Local: Posições			
	X2	X3	X4
Y2	2	3	4
Y3	1	0	5
Y4	8	7	6

Figura 8. Exemplo de matriz local de posições do ponto (X3, Y3)

Neste ponto (X3, Y3) a formiga está na vizinhança de uma área de preservação no posição 4 ou ponto (X4, Y2) na cor verde na figura 8 e 9. Além disso, o ponto 2 foi o último ponto visitado pela formiga sendo representado na cor roxa nas figuras 8 e 9. Portanto, a matriz de exclusão local pode ser representada pela figura 9.

Matriz Local: Exclusão			
	X2	X3	X4
Y2	-10	0	-20
Y3	0	0	0
Y4	0	0	0

Figura 9. Exemplo de matriz local de exclusão do ponto (X3, Y3)

Assim o conjunto M_k de vizinhos validos passa a ser composto pelos pontos 1, 3, 5, 6, 7 e 8. A probabilidade da formiga escolher algum dos vizinhos validos do conjunto M_k na posição (X3, Y3) pode ser calculada para cada ponto através da equação 8. A figura 10 apresenta a probabilidade dos 6 vizinhos possíveis do ponto (X3, Y3).

Matriz Local: Probabilidade do ponto (%)			
	X2	X3	X4
Y2	0	49,739	0
Y3	49,739		0,287
Y4	0,086	0,083	0,067

Figura 10. Exemplo de matriz local de probabilidade do ponto (X3, Y3)

Com a probabilidade de cada ponto, pode-se criar a roleta de probabilidade do ponto (X3, Y3)

Matriz Local: Roleta de probabilidade (%)			
	X2	X3	X4
Y2	49,739	99,477	99,477
Y3	49,739		99,764
Y4	100,000	99,914	99,831

Figura 11. Exemplo de matriz local com roleta de probabilidade do ponto (X3, Y3)

A roleta de probabilidade de figura 11 pode ser reescrita com valores mínimos e máximos de probabilidade para cada um dos 8 pontos vizinhos, conforme apresentado na figura 12.

Posição	Menor valor (%)	Maior valor (%)
1	0	49,739
2	49,739	49,739
3	49,739	99,477
4	99,477	99,477
5	99,477	99,764
6	99,764	99,831
7	99,831	99,914
8	99,914	100,000

Figura 12. Exemplo de roleta de probabilidade do ponto (X3, Y3)

Os pontos vizinhos 2 (último ponto visitado) e 4 (área de preservação) são evitados por possuírem valores os valores mínimos e máximo de probabilidade iguais para o ponto, conforme apresentado na figura 12.

As probabilidades dos pontos 1 (X2,Y3) e 3 (X3,Y2) são mais elevadas no exemplo porque apresentam áreas de relevo mais baixos do que o ponto do relevo atual conforme apresentado na figura 13. A potência de bombeamento para é menor para pontos que possuem descidas no relevo porque a parcela $FO_{p_b}^1$ referente a diferença de relevos é igual a zero, conforme equação 3 e 5.

Matriz Local: Relevo (m)			
	X2	X3	X4
Y2	889,819	891,749	893,354
Y3	892,425	893,752	895,879
Y4	900,854	901,126	902,884

Figura 13. Exemplo de matriz local do relevo do ponto (X3, Y3)

Da mesma forma os pontos 5 (X4,Y3), 6 (X4,Y4), 7 (X3,Y4) e 8 (X2,Y4) possuem probabilidades mais baixas por possuírem pontos do relevo maiores que o ponto atual 0 (X3, Y3) conforme apresentado na figura 13.

No início da otimização a formiga busca pelos alimentos nas regiões mais baixas do espaço de busca, porém após esses pontos serem visitados a matriz de locais visitados é incrementada proporcionalmente ao número de visitas. Por tanto, a probabilidade deste local ser visitado novamente é diminuída devido o novo termo $\left(\left[\frac{1}{\omega(i,j)}\right]^Y\right)$ proposto neste artigo para a função de probabilidade proposta por Dorigo et al., (1996). Este termo transmite memória dos locais já visitados pela formiga em análise. Com essa memória e termo $\left(\left[\frac{1}{\omega(i,j)}\right]^Y\right)$ a formiga aumenta a probabilidade de buscar a comida nos pontos mais elevados do relevo e não ficar presa em pontos de vales na matriz global de relevo e espaço de busca.

Para escolher o próximo ponto a ser visitado o algoritmo sorteia um número aleatório entre 0 e 100%. Considerando que o número sorteado fosse 73,2%, então a nova posição a ser visitada seria o vizinho do ponto número 3 (X3,Y2) conforme faixas de probabilidade da figura 12.

III.B. FORMIGA NO MODO BACKWARD (VOLTA)

No algoritmo MMAS proposto por (Stutzle e Hoos, 2000) a atualização do feromônio é feita apenas quando termina o modo forward (ida) de todas as formigas. Este feromônio pode ser atualizado no caminho da melhor formiga da iteração ou melhor formiga global. Neste artigo será utilizado uma estratégia dinâmica onde usa-se a melhor formiga até o momento e em outros momento melhor formiga da iteração.

Durante o método da busca pelo alimento a formiga pode criar loops desde do ninho até comida. Para avaliar todas as formigas da iteração, primeiramente são eliminados todos loops criados por cada formiga. Em seguida, é aplicada a função objetivo (equação 3) neste caminho sem loops. As formigas são ordenadas em ordem decrescente pela função objetivo após avaliação de todas as formigas. A melhor formiga da iteração é selecionada e salva para posterior comparação.

De acordo com Stutzle e Hoos (2000) a utilização da melhor solução de uma iteração aumenta o efeito de exploração das melhores soluções durante o processo de busca (Stutzle e Hoos, 2000). Ao mesmo tempo, contribui para o efeito de intensificação do processo utilizando sempre as melhores soluções em cada iteração para a atualização do feromônio. Por esse motivo neste artigo foi escolhido uma probabilidade de 90% da escolha de depositar feromônio no caminho da melhor formiga da iteração e 10% da melhor formiga global até o momento.

O feromônio da melhor formiga é atualizado pela equação 9 após escolha aleatória entre a melhor formiga da iteração ou melhor formiga global.

$$\tau_{(x,y)} = (1 - \rho) \cdot \tau_{(x,y)} + \Delta\tau_{(x,y)}^{\text{melhor}} \quad (9)$$

Onde:

$\tau_{(x,y)}$: feromônio sobre determinado ponto do caminho com coordenadas x e y.

$\rho \in (0,1]$ a taxa de evaporação de feromônio que foi depositado anteriormente.

$\Delta\tau_{(x,y)}^{\text{melhor}}$: aumento da quantidade de feromônio do melhor agente no ponto do caminho com coordenadas x e y.

x: coordenada de latitude do ponto.

y: coordenada de longitude do ponto.

O aumento da quantidade de ferôminio no caminho percorrido pela melhor formiga é proporcional a qualidade da solução encontrada pelo agente e pode ser calculado através da equação 10.

$$\Delta\tau_{(x,y)}^{\text{melhor}} = \begin{cases} FC_{P_b} \cdot \frac{1}{P_b^{BS}} & \text{se } (x_{F_{P_b}}, y_{F_{P_b}}) \in F_{P_b} \\ 0 & \text{se } (x_{F_{P_b}}, y_{F_{P_b}}) \notin F_{P_b} \end{cases} \quad (10)$$

Onde:

FC_{P_b} = fator de conversão de unidade da potência de bombeamento para kW (10^3) ou MW (10^6).

P_b^{BS} = melhor solução até o momento (melhor global ou melhor da iteração).

F_{P_b} = conjunto dos pontos do caminho da melhor formiga (melhor global ou melhor da iteração).

$(x_{F_{P_b}}, y_{F_{P_b}})$: par ordenado de coordenadas X (latitude) e Y (longitude) do ponto no espaço de busca que fazem parte do caminho da melhor formiga.

Sendo P_b^{BS} o valor da melhor solução encontrada da função objetivo até o momento seja este o melhor solução global ou a melhor solução da iteração.

Conforme na natureza as antigas soluções encontradas nas iterações anteriores podem ser esquecidas caso as formigas parem de visitar esses caminhos por encontrarem um caminho melhor. Esse conhecimento da natureza é transmitido para a otimização por colônia de formigas pelo feromônio ser uma substância volátil que evapora com uma taxa (ρ) entre [0, 1].

III.B. FEROMÔNIO INICIAL, MÁXIMO E MÍNIMO

Uma característica diferente do MMAS dos outros algoritmos de colônia de formigas são os limites superior e inferior para o nível de feromônio.

Ao atualizar o feromônio da matriz global de feromônio através da melhor formiga escolhida em um determinado ponto espaço de busca o algoritmo MMAS limita os valores $\tau_{\max}$ e $\tau_{\min}$. Em outras palavras, o feromônio não pode ultrapassar o $\tau_{\max}$ do ponto no momento da deposição de novo feromônio calculado através da equação 9. Além disso, os pontos dos lugares que não estão sendo visitados não podem ter o feromônio evaporado que resulte em um valor do ponto menor que o $\tau_{\min}$.

Desta forma o MMAS impõe limites superior e inferior para evitar que o feromônio

depositado no melhor caminho fique muito grande. Através desta limitação entre um valor máximo e um mínimo de τ . Caso cada iteração $\tau_{(x,y)} > \tau_{\max}$, então o valor a ser considerado será $\tau_{(x,y)} = \tau_{\max}$. Além disso, caso o valor do feromônio $\tau_{(x,y)} < \tau_{\min}$, então o valor do feromônio será $\tau_{(x,y)} = \tau_{\min}$ conforme apresentado em (Stutzle e Hoos, 2000).

A proposta de (Stutzle e Hoos, 2000) de impor limites ao feromônio, tem um efeito de intensificação no processo de busca da melhor solução com maior número de possibilidades.

Uma dificuldade é determinar quais são os valores apropriados para $\tau_{\min}$ e $\tau_{\max}$. Em (Stutzle e Hoos, 2000) foi definido uma proposta para determinar $\tau_{\max}$ que é apresentado na equação 11 para a formulação do problema deste artigo.

$$\tau_0 = FC_{P_b} \cdot \frac{1}{\rho \cdot P_b^{BS}} \quad (11)$$

Onde:

τ_0 = feromônio inicial

P_b^{BS} = melhor solução até o momento (melhor global ou melhor da iteração)

FC_{P_b} = fator de conversão de unidade da potência de bombeamento para kW (10^3) ou MW (10^6).

Por outro não existe um completo acordo sobre como pode ser determinado o valor de $\tau_{\min}$. De acordo com Dorigo et al., (1996) o valor de $\tau_{\min}$ é determina empiricamente (Dorigo et al., 2000). Além disso, Stutzle e Hoos (2000) também propõem inicializar o algoritmo fazendo $\tau_0 = \tau_{\max}$, para obter uma intensa exploração das soluções no espaço de busca (Stutzle e Hoos, 2000), sendo essa orientação adotada neste artigo.

IV. RESULTADOS

Para demonstrar o funcionamento do colônia de formigas MMAS implementada. O programa será aplicado em um espaço de busca com 40 pontos (1200 m) x 6 pontos (480 m) com discretização de 30 x 30 metros para cada ponto apresentado na figura 14a. Os dados de relevo foram retirados de uma região montanhosa e obtidos através do software de geoprocessamento QGIS.

A matriz global de relevo para essa aplicação está apresentado na figura 14.

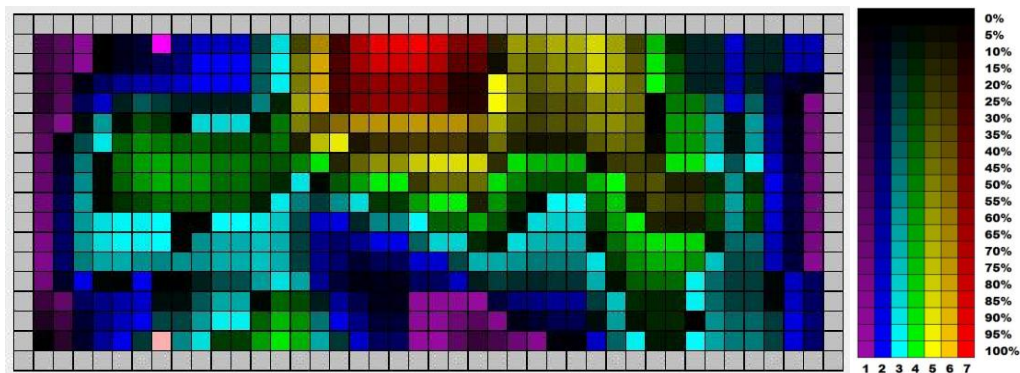


Figura 14. (a) Matriz global de relevo do teste. (b) legenda do relevo

O relevo na figura 14.a está representado de acordo com a legenda da figura 14.b. O relevo está dividido em 7 faixas de cores de acordo com as cores do arco-iris, sendo violeta para as regiões com menores alturas de relevo e vermelho com as maiores alturas. Além disso, cada uma das 7 faixas de relevo (figura 14b) está dividido em um degrade de cores que varia proporcionalmente entre 0 e 100% do relevo correspondente a faixa de relevo da respectiva cor, conforme apresentado na figura 14.b e tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de relevo

Número da faixa	Cor	Mínimo relevo (m)	Máximo relevo (m)
7	Vermelho	946,126	955,510
6	Laranja	936,741	946,126
5	Amarelo	927,357	936,741
4	Verde	917,972	927,357
3	Anil	908,588	917,972
2	Azul	899,203	908,588
1	Violeta	889,819	899,203

As áreas de preservação teroricas foram utilizadas para criar e restringir 3 pontes de caminhos possíveis do ninho até a comida da formiga, conforme apresentado na matriz global ambiental na figura 15. O ninho da colônia de formiga está representado pela cor de rosa claro e a comida está representado pela cor rosa escuro na figura 15.

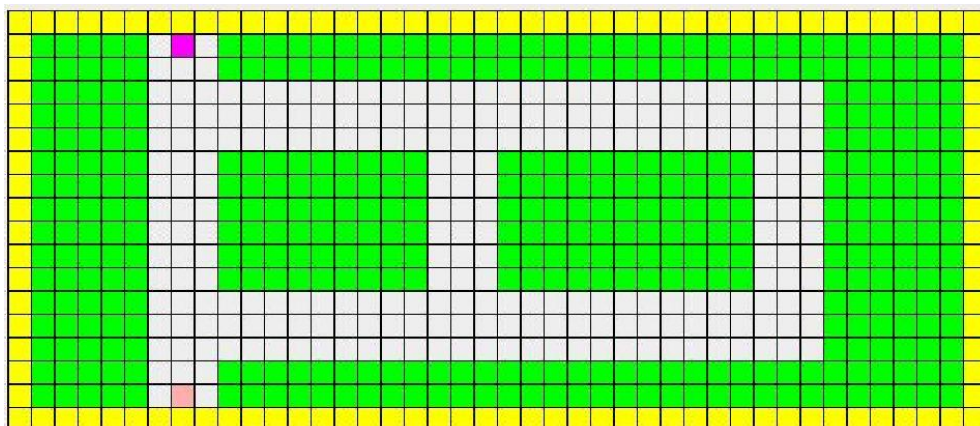


Figura 15. Matriz global ambiental do caso teste 1

Com base na matriz global ambiental (pontos em verde) e condições de contorno (pontos em amarelo) da figura 15, o programa criou a matriz global de exclusão apresentado na figura 16. Os pontos em cinza na figura 16 são os locais que a formiga não pode visitar por fazerem parte da matriz global de exclusão do espaço de busca na matriz global de relevos apresentada na figura 14a.

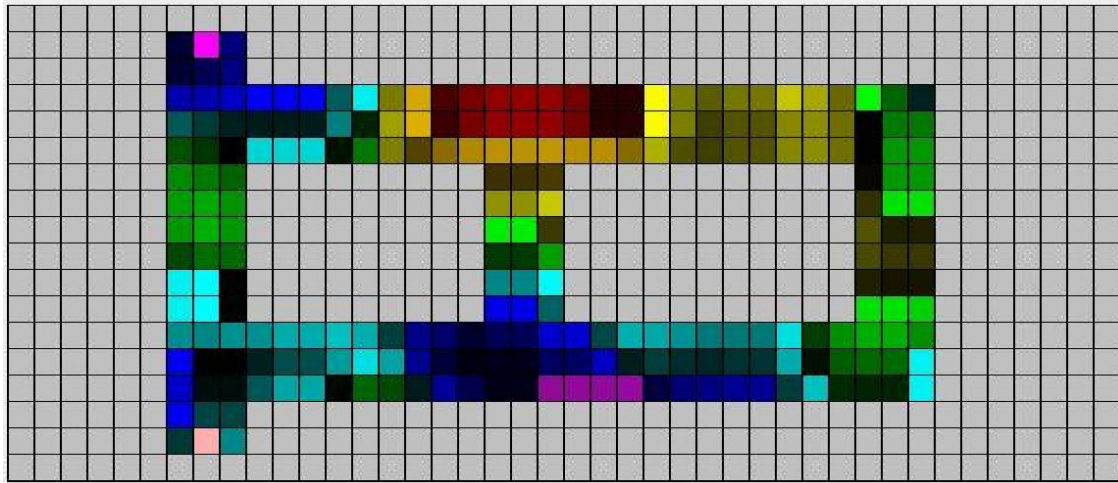


Figura 16

Com base no ambiente e espaço de busca apresentado na figura 16 serão realizados 3 tipos de otimizações, sendo:

Caso teste 1: Ambiente sem bloqueio das 3 pontes (Figura 15).

Caso teste 2: Ambiente com bloqueio da ponte da esquerda (Figura 17).

Caso teste 3: Ambiente com bloqueio da ponte da esquerda e central (Figura 18).

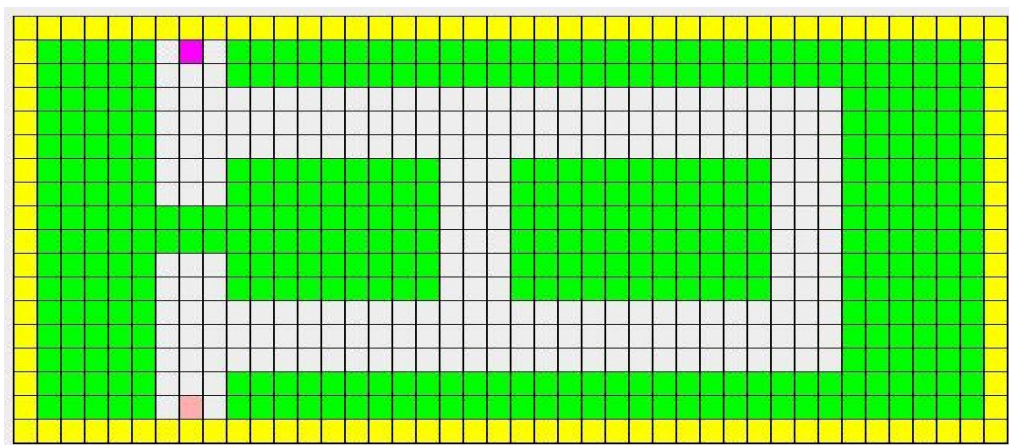


Figura 17. Matriz global ambiental do caso teste 2

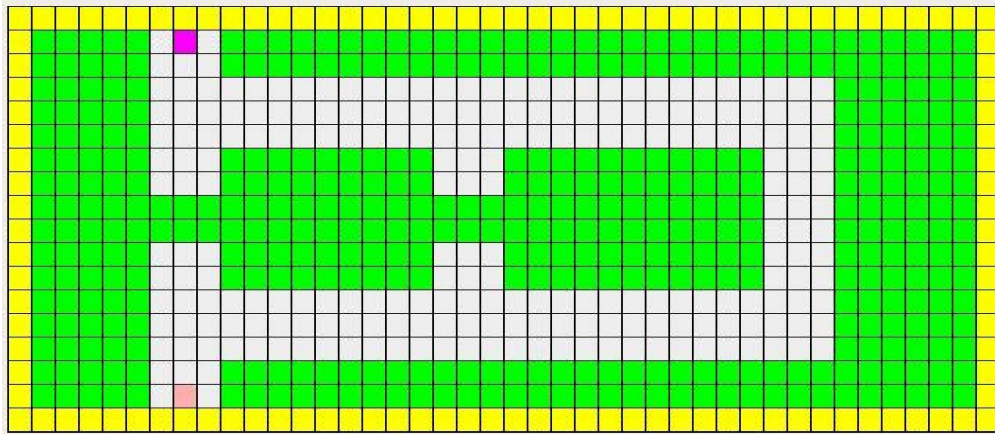


Figura 18. Matriz global ambiental do caso teste 3

A configuração do colônia de formiga está apresentado a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 1 \\ \beta = 1 \\ \gamma = 100 \\ \rho = 0,01 \\ \text{número de formigas (m)} = 10 \\ \tau_0 = 0,001 \\ FC = 10^6 \end{array} \right.$$

Nos estudos de 3 casos testes apresentados neste artigo os pontos em branco na figura 19, 21 e 23 representam o melhor caminho escolhido pelas formigas, pois minimiza a função objetivo da equação 4.

No caso teste 1 as formigas tiveram livre passagem para saírem do ninho (ponto rosa claro na parte inferior) até comida (ponto rosa escuro na parte superior) podendo passar pelas 3 pontes existentes no espaço de busca na figura 19. As formigas escolheram como o caminho com menor potência de bombeamento a ponte esquerda da figura 19. Sendo essa também a ponte com o caminho linear mais curto, além de apresentar a menor potência de bombeamento.

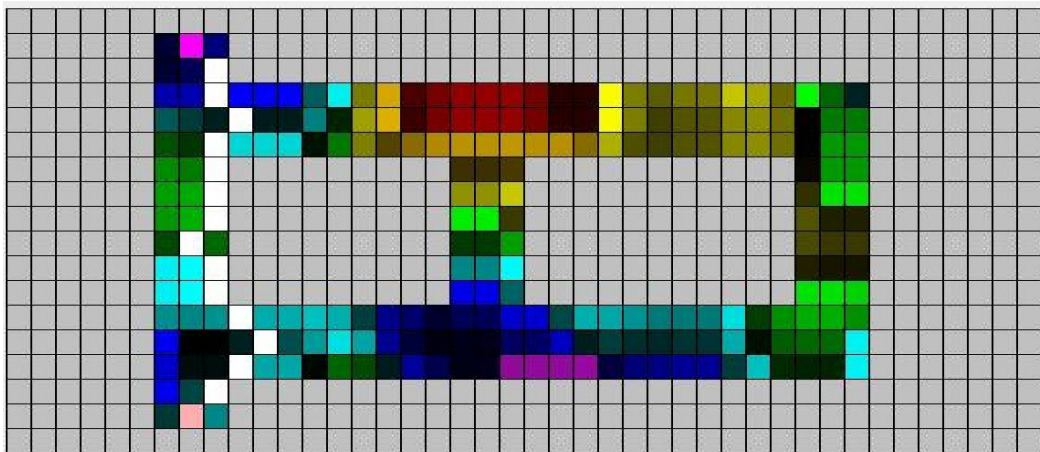


Figura 19. Matriz global relevo do caso teste 1

A figura 20 apresenta o perfil de relevo do melhor caminho escolhido pela colônia de formigas após 10 mil gerações. A figura 19 mostra que o perfil de relevo encontrado não apresenta grandes oscilações entre subidas e descidas desnecessárias que dificultariam a construção das tubulações de transferência. Esse resultado atende o conhecimento passado para a colônia de formigas através do termo ($FO_{p_b}^1$) na equação 5.



Figura 20. Gráfico do perfil de relevo da melhor formiga do caso teste 1

No estudo de caso teste 2 a ponte da esquerda do espaço de busca foi bloqueada com área de preservação, conforme apresentado na figura 18 e 21. O melhor caminho encontrado pelas formigas depois de 10 mil gerações está apresentado na figura 21. As formigas tinham 2 opções de caminhos possíveis, sendo a ponte central e ponte da direita para saírem do ninho (ponto rosa claro na parte inferior) e chegarem na comida (ponto rosa escuro na parte superior). Apesar das 2 opções as formigas escolheram o menor caminho linear correspondente a ponte central atendendo assim a parcerla $FO_{p_b}^2$ (equação 6) da função objetivo de minimização da potência de bombeamento. Além disso, as formigas encontram um caminho suave para o perfil de relevo com o melhor caminho facilitando assim a construção das tubulações de transferência e atendendo a parcerla $FO_{p_b}^1$ (equação 5) da função objetivo do problema conforme apresentado na figura 22.

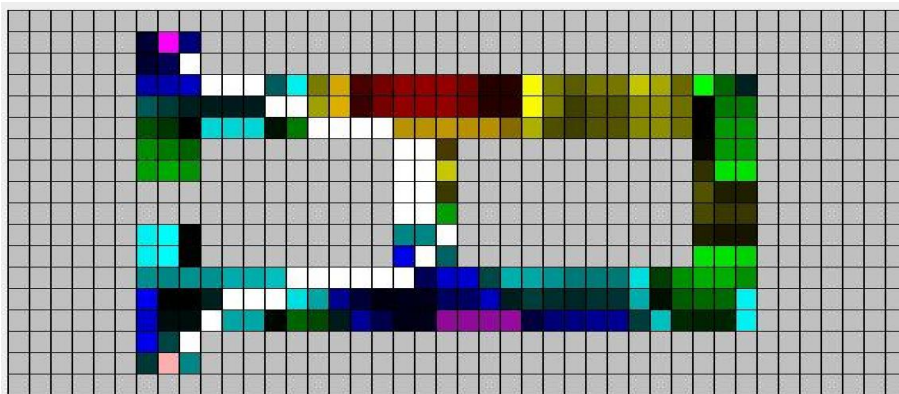


Figura 21. Matriz global relevo do caso teste 2

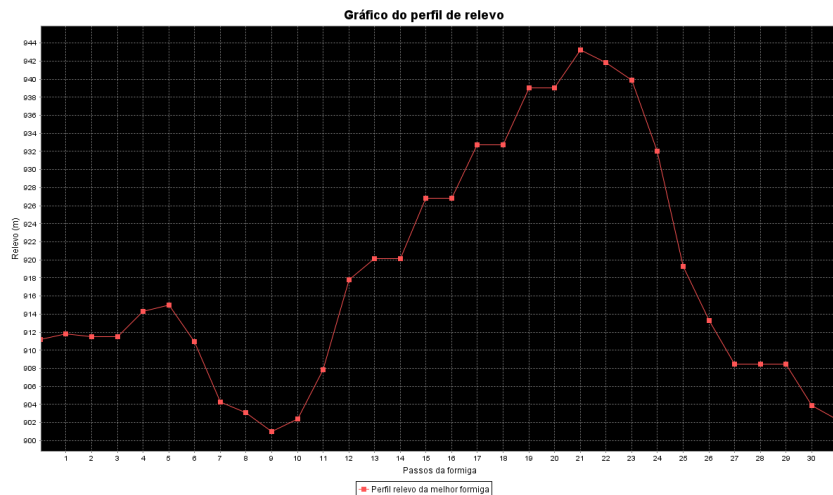


Figura 22. Gráfico do perfil de relevo da melhor formiga do caso teste 2

No estudo de caso teste 3 a ponte da esquerda e central do espaço de busca foram bloqueadas com área de preservação, conforme apresentado na figuras 18 e 23. O melhor caminho encontrado pelas formigas depois de 10 mil gerações está apresentado na figura 23.

Apesar das formigas terem apenas uma ponte possível com caminho mais difícil (maior distância e maior variações de relevo) para saírem ninho (rosa claro) e chegarem na comida (rosa escuro) elas encontraram soluções factíveis e minimizando a função objetivo da equação 4. O melhor caminho encontrado como resposta pelas formigas está representado em branco na figura 23 e com o respectivo perfil de relevo da transferência na figura 24.

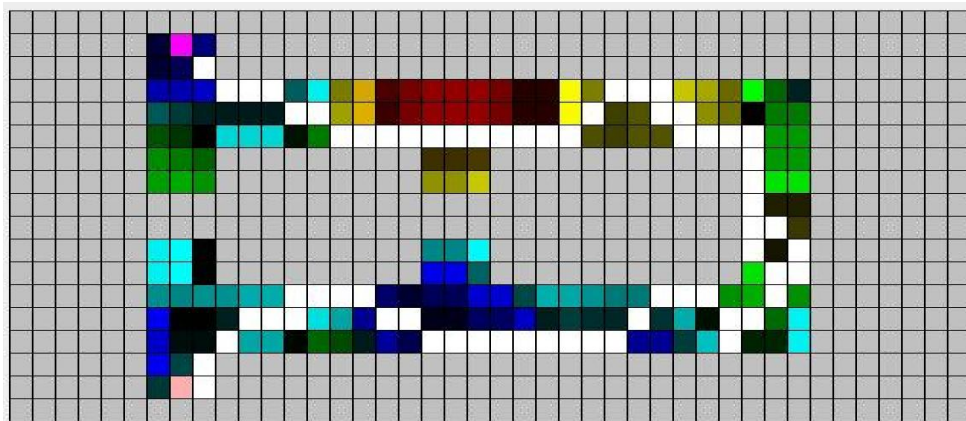


Figura 23. Matriz global relevo do caso teste 3

As formigas encontram um caminho suave para o perfil de relevo com o caminho otimizado facilitando assim a construção das tubulações de transferência e atendendo a parcela $FO_{p_b}^1$ (equação 5) da função objetivo do problema conforme apresentado na figura 24



Figura 24. Gráfico do perfil de relevo da melhor formiga do caso teste 3

VI. CONCLUSÃO

O MMAS apresentado neste artigo para a minimização da potência de bombeamento entre dois pontos no espaço de busca do problema conseguiu encontrar perfil de relevo suave para a construção das tubulações de transferência nos três casos testes apresentados neste artigo. Além disso, o algoritmo desenvolvido demonstrou operação adequada ao evitar as áreas de preservação ambiental apresentados nos 3 casos testes para limitar as 3 pontos no espaço de busca da matriz global de relevo que ligavam o ninho (ponto de partida) até a comida (destino) da formiga e transferência proposta. Por fim, os três casos mostram que a função objetivo proposta para o problema conseguiram transferir para as formigas os conhecimentos i) minimização da parcela referente aos bombeamento em todas as subidas no perfil de relevo; ii) minimização da parcela linear da construção das tubulações de transferência e iii) encontrar o perfil suave para construção das do sistema de transferência, facilitando a construção e implementação do projeto.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour KC, Schulin R, Genuchten MTV (2001) Estimating unsaturated soil parameters using ant colony optimization. *Adv Water Resour* 24(8):827 – 841
- Afshar MH (2006a) Elitist continuous ant colony optimization algorithm: application to reservoir operation problems. *Int J Civ Eng* 4(4):274 – 285
- Afshar MH (2007b) Partially constrained ant colony optimization algorithm for the solution of constrained optimization problems: application to storm water network design. *Adv Water Resour* 30:954 – 965
- Afshar MH, Moeini R (2008) Partially and fully constrained ant algorithms for the optimal solution of large scale reservoir operation problems. *Water Resour Manag* 22:1835 – 1857
- Dorigo M, Maniezzo V, Coloni A (1996) The ant system: optimization by a colony of cooperating ants. *IEEE Trans Syst Man Cybern* 26:29 – 42
- Emami Skardi MJ, Afshar A, Sandoval Solis S (2013) Simulation-optimization model for non-point source pollution management in watersheds: application of cooperative game theory. *KSCE J Civ Eng* 17(6):1232 – 1240

- Guo W, Wang H (2010) Optimal operation of three gorges reservoir based on ant colony algorithm. 2010 international conference on intelligent computing and cognitive informatics, 2010 IEEE. doi: 10.1109/ICICCI.2010.101, 1 – 4
- Hilton C, He AB, Li Y (2005) Optimal groundwater sampling network design through ant colony optimization. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2005) (June 25 – 29, 2005, Washington, DC). ACM, 6 pp
- Huang SJ (2001) Enhancement of hydroelectric generation scheduling using ant colony system based optimization approaches. IEEE Trans Energy Convers 16(3):296 – 301
- Jalali MR, Afshar A, Marino MA (2006a) Improved ant colony optimization algorithm for reservoir operation. Sci Iran 13(3):295 – 302
- Jalali MR, Afshar A, Marino MA (2006b) Reservoir operation by ant colony optimization algorithms. Iran J Sci Technol Trans B Eng 30(B1):107 – 117
- Kumar ND, Reddy JN (2006) Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation. Water Resour Manag 20:879 – 898
- Li Y, Hilton ABC (2007) Optimal groundwater monitoring design using an ant colony optimization paradigm. Environ Model Softw 22:110 – 116
- Maier HR, Simpson AR, Foong WK, Phang KY, Seah HY, Tan CL (2001) Ant colony optimisation for the optimal design of water distribution systems. World Water & Environmental Resource Congress, Orlando, Florida, USA, Proceedings on CD-ROM
- Maier HR, Simpson AR, Zecchin AC, Foong WK, Phang KY, Seah HY, Tan CL (2003) Ant colony optimization for the design of water distribution systems. J Water Resour Plan Manag 129(3):200 – 209
- Moeini R, Afshar MH (2009) Application of an ant colony optimization algorithm for optimal operation of reservoirs: a comparative study of three proposed formulations. Sci Iran Trans A Civ Eng 16(4):273 – 285
- Moeini R, Afshar MH (2011) Arc- based constrained ant colony optimization algorithms to the optimal solution of hydropower reservoir operation problems. Can J Civ Eng 38(7):811 – 824
- Simpson AR, Maier HR, Foong WK, Phang KY, Seah HY, Tan CH (2001) Selection of parameters for ant colony optimization applied to the optimal design of water distribution system. Proc., Int. Congress on Modelling and Simulation, Canberra, Australia, 1931 – 1936
- Stutzle T, Hoos HH (2000) Max-Min ant system. Futur Gener Comput Syst 16:889 – 914
- Valeiano, M. M., ROSSETTI, D. F. (2011) Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. Applied Geography 32, 300-309.
- Zecchin AC, Maier HR, Simpson AR, Roberts AJ, Berrisford MJ, Leonard M (2003) Max-min ant system applied to water distribution system optimization. In: Proc. Int. Congr. Modeling Simulation (MODSIM), Vol.: 2, Townsville, Australia, 795 – 800
- Zecchin AC, Simpson AR, Maier HR (2005) Parametric study for an ant algorithms applied to water distribution system optimization. IEEE Trans Evol Comput 9(2):175 – 191
- Zecchin AC, Simpson AR, Maiera HR, Leonarda M, Andrew JR, Berrisforda MJ (2006) Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization. Math Comput Model 44:451 – 468
- Zecchin AR, Maier HR, Simpson AR, Leonard M, Nixon JB (2007a) Ant colony optimization algorithms applied to water distribution systems design: a comparative study. J Water Resour Plan Manag, ASCE 133(1):87 – 92
- Zecchin AC, Maier HR, Simpson AR (2007b) Case study based convergence behavior analysis of ACO applied to optimal design of water distribution systems. In: Chan F, Chan TS, Tiwari MK (eds) Swarm intelligence: focus on ant and particle swarm optimization, Itech. Education and Publishing, Vienna, pp 419 – 446. ISBN 978-3-902613-09-7