

# METAHEURÍSTICA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO DO TRAÇADO DE CANAIS – PARTE II: APLICAÇÃO PRÁTICA

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

**RESUMO** – O presente artigo está dividido em duas partes. Nessa segunda parte é apresentada uma aplicação prática dos algoritmos referidos na Parte I do artigo. Uma derivação do Eixo Leste do Projeto de Integração do São Francisco (PISF), denominada Ramal do Agreste Pernambucano, contando com cerca de 47 km de canal adutor, detalhado em nível de Projeto Executivo, é analisado em seus aspectos de custos de implantação e comparado a uma alternativa de traçado obtida com os algoritmos descritos na primeira parte do artigo. Com a aplicação conjunta dos algoritmos, demonstra-se a existência de uma alternativa ao traçado atualmente disponível, verificando-se esta ser mais atrativa do ponto de vista econômico.

**ABSTRACT** – This article is divided into two parts. In this second part, a practical application of the algorithms in Part I of the article is displayed. A derivation of the East Channel PISF - Integration Project of the San Francisco branch called the “Ramal do Agreste Pernambucano”, with about 47 km detailed Project Executive level is analyzed in aspects of implementation costs and compared to an alternative tracing obtained with the algorithms described in the first part of the paper. With the joint application of algorithms, demonstrates the existence of an alternative route to the currently available, verifying this to be more attractive from an economic view.

**Palavras - chave:** Algoritmo metaheurístico, algoritmo A\*, Ramal do Agreste Pernambucano.

---

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

## 1 – APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS

Com vistas a testar a adequabilidade da combinação dos algoritmos referidos na primeira parte do presente artigo, buscou-se um exemplo real de adução por canal: o chamado Ramal do Agreste de Pernambuco, uma derivação do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco.

Conforme Projeto Executivo elaborado para o Ministério da Integração Nacional (MI, 2012), o Ramal do Agreste foi concebido com comprimento total de cerca de 70,8 km e está situado no norte do Estado de Pernambuco, próximo da fronteira com o Estado da Paraíba, desenvolvendo-se em área integrante dos municípios de Sertânia e Arcoverde (Figura 1).

Desde o ponto de derivação (aproximadamente no km 182+900 do Eixo Leste) até seu destino final – barragem de Ipojuca na bacia homônima, o traçado concebido em nível executivo atravessa diversas sub-bacias hidrográficas afluentes do rio Moxotó, antes de transpor o divisor de águas, e do rio Ipojuca, após transpor o divisor.

A derivação no Eixo Leste do PISF dar-se via estrutura de Controle do reservatório Barro Branco com condução gravitória através de canais trapezoidais escavados a céu aberto, aquedutos e túneis até o quilômetro 47,2 km, onde foi prevista uma Estação de Bombeamento EB1 para elevar a vazão de  $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$ , a cerca de 220 m de desnível, efetivando assim a transposição entre as bacias dos rios Moxotó e Ipojuca. No trecho subsequente, o montante hídrico transposto flui por gravidade até o reservatório Ipojuca, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 - Localização e Obras principais do Ramal do Agreste (MI, 2012)

De acordo com o Projeto Executivo do empreendimento, além da estrutura de controle da barragem Barro Branco (que faz parte do conjunto de obras do Eixo Leste), integram o rol de obras de infraestrutura do Ramal do Agreste, a partir do km 0 (estrutura de controle), os elementos

arrolados na Tabela 1. Nela também se encontra um resumo das principais grandezas obtidas pelo dimensionamento hidráulico realizado em nível de Projeto Executivo.

Tabela 1 - Ramal do Agreste Pernambucano - Dimensionamento Hidráulico (MI, 2012)

Obra	trecho		distância parcial (m)	tirante h (m)	base b (m)	Elevações ( m)				Talude 1(v):?(h)
	Início (km+m)	fim (km+m)				NA		Fundo		
						mont	jus	mont	jus	
<b>Estrutura Controle Barragem Barro Branco</b>	0 + 0	0 + 147	46,35	2,70	2,50	597,73	597,71	595,03	595,03	0
<b>Início/ CANAL C1</b>	0 + 0	1 + 558	1.558,00	1,90	3,00	597,71	597,55	595,81	595,654	1,5
<b>Aqueduto Passagem</b>	1 + 558	2 + 158	600,00	1,90	3,40	597,55	597,31	595,65	595,41	0
<b>CANAL C2</b>	2 + 158	2 + 731	573,00	1,90	3,00	597,31	597,26	595,41	595,36	1,5
<b>Túnel Cacimba da Mata</b>	2 + 731	3 + 507	776,00	2,82	4,30	597,26	596,95	594,44	594,13	
<b>CANAL C3</b>	3 + 507	4 + 97	590,00	1,90	3,00	596,95	596,89	595,05	594,99	1,5
<b>Túnel Cachoeira</b>	4 + 97	5 + 301	1.204,00	2,82	4,30	596,89	596,41	594,07	593,59	
<b>CANAL C4</b>	5 + 301	5 + 430	129,00	1,90	3,00	596,41	596,39	594,51	594,49	1,5
<b>Aqueduto Boqueirão</b>	5 + 430	5 + 755	325,00	1,90	3,40	596,39	596,26	594,49	594,36	0
<b>CANAL C5</b>	5 + 755	9 + 905	4.150,00	1,90	3,00	596,26	595,85	594,36	593,95	1,5
<b>Aqueduto Jiboi</b>	9 + 905	10 + 255	350,00	1,90	3,40	595,85	595,71	593,95	593,81	0
<b>CANAL C6</b>	10 + 255	16 + 314	6.059,00	1,90	3,00	595,71	595,10	593,81	593,20	1,5
<b>Túnel Bom Nome</b>	16 + 314	17 + 501	1.187,00	2,82	4,30	595,10	594,63	592,28	591,81	
<b>CANAL C7</b>	17 + 501	19 + 490	1.989,00	1,90	3,00	594,63	594,43	592,73	592,53	1,5
<b>Aqueduto Lagoa do Meio</b>	19 + 490	19 + 815	325,00	1,90	3,40	594,43	594,30	592,53	592,40	0
<b>CANAL C8</b>	19 + 815	36 + 680	16.865,23	1,90	3,00	594,30	592,61	592,40	590,71	1,5
<b>Reservatório Negros</b>	36 + 680	37 + 292	612,23			N A Máx Maximorum = 593,75m				
<b>Estrutura Controle Barragem Negros</b>	37 + 292	37 + 407	114,54	2,70	2,50	592,60	592,58	589,90	589,90	0
<b>CANAL C9</b>	37 + 407	43 + 202	5795	1,90	3,00	592,58	592,00	590,68	590,10	1,5
<b>Aqueduto Minador</b>	43 + 202	43 + 477	275,00	1,90	3,40	592,00	591,89	590,10	589,99	0
<b>CANAL C10</b>	43 + 477	44 + 113	636	1,90	3,00	591,89	591,83	589,99	589,93	1,5
<b>Túnel Tigre</b>	44 + 113	45 + 33	920	2,82	4,30	591,83	591,46	589,01	588,64	
<b>CANAL C11</b>	45 + 33	47 + 107	2074	1,90	3,00	591,46	591,25	589,56	589,35	1,5

Os algoritmos descritos foram empregados na obtenção de um traçado alternativo ao trecho em canal do Projeto Executivo (primeiros 47 km). Para isso, foram adotados como principais ferramentas os sistemas computacionais **SIDOC** (Sarmiento, 2008) e **ProjCanal** (Sarmiento e Molinas, 2012).

O sistema computacional **SIDOC – Sistema Integrado de Dimensionamento Integrado de Canais** foi desenvolvido especificamente para possibilitar, de forma automática, o dimensionamento, o projeto geométrico, a quantificação e o orçamento de canais abertos, fazendo uso dos critérios de projeto definidos pelo Ministério da Integração Nacional (MI) para os Eixos Norte e Leste do PISF.

O **ProjCanal** faz uso da rotina de projeto geométrico de seções transversais integrantes do SIDOC. O algoritmo metaheurístico referido (Sarmiento e Molinas, 2012) percorre cada ponto da malha do MDT, desde o ponto de captação da água até o ponto de entrega, decidindo a cada passo de 30 metros qual a direção mais econômica a ser tomada. A retícula de 30m X 30m que se apresentar mais vantajosa é eleita como sendo integrante do caminho ótimo buscado.

Antes da aplicação do sistema **ProjCanal** à geração de alternativa para o Ramal do Agreste, foi definida uma faixa viável de pesquisa de soluções ótimas. A definição da faixa foi feita com base no algoritmo A\*, conforme descrito anteriormente. Foi então possível identificar matematicamente o caminho mais curto entre dois pontos do MDT do RSTM/INPE interpondo-se no trajeto, na forma de obstáculo, todo e qualquer ponto que, em elevação, superasse determinado valor limite de cota. Dessa forma, definiu-se uma espécie de “corredor” no interior do qual o sistema **ProjCanal** pode pesquisar (em um domínio muito mais restrito e matematicamente delimitado) o caminho ótimo para se alcançar o mesmo ponto onde o segmento C11 do Projeto Executivo alcança, ou seja, o ponto onde se prevê a instalação da EB01.

A Figura 2 mostra o traçado de menor distância viabilizado pelo algoritmo A\*. As zonas em tom cinza representam os obstáculos dos quais o algoritmo precisou desviar para encontrar o caminho mais curto entre os dois pontos (verde = captação no Leste; vermelho = final do segmento de canal C11 – EB01). Tais zonas compreendem todos os pontos dos MDT com cotas abaixo de 570m e acima de 620m.

Note-se que a faixa de valores de cotas definidora do corredor de pesquisa deverá, obrigatoriamente, conter a cota correspondente à carga hidráulica disponível. No caso, o fundo do canal no início do segmento C1 encontra-se na cota 595,81m.

É de se registrar a semelhança de forma entre o caminho de menor distância planimétrica indicado na Figura 3 e a configuração geral do traçado do Projeto Executivo. Tal fato aponta para um julgamento positivo do traçado executivo, pelo menos em termos planimétricos.

A admissibilidade do uso do MDT gerado a partir dos dados de RSTM para os fins aqui propostos fundamenta-se na hipótese de que, ao se transpor o traçado executivo para essa base cartográfica onde é feito o traçado de alternativas, torna-se possível fazer comparações entre os itens quantitativos de maior interesse, levantados tanto no projeto executivo quanto em qualquer alternativa considerada. Para tornar possíveis as comparações, cada uma das seções estaqueadas em qualquer um dos traçados é projetada de acordo com a topografia do MDT, tendo-se como fatores de automatização do projeto geométrico de cada seção transversal diversos parâmetros (Sarmiento, 2008).

O desenho 1250-DES-5201-20-15-003 - Relatório Final do Projeto Executivo - Ramal do Agreste - Pontos de Deflexão Horizontal trás as coordenadas UTM dos PI's conformadores do traçado do Projeto Executivo. Ao todo, o referido desenho lista um número de 100 PI's, devidamente identificados em planta, com os quais, tendo-se como base o MDT já mencionado, foi elaborado um mapa representado na Figura 4, na qual se vê o traçado executivo desde o primeiro PI até a estação de bombeamento EB-01.



Figura 2 - Traçado de menor distância. Obstáculos: 570m > cotas > 620m.

Embora o MDT oriundo dos dados do INPE preserve integralmente as configurações de relevo presentes na região de interesse, descendo-se ao detalhe da comparação entre a altimetria do traçado do eixo do canal representado na Figura 3 com a correspondente topografia do Projeto Executivo verifica-se, conforme era de se esperar, que existem diferenças entre as cotas.

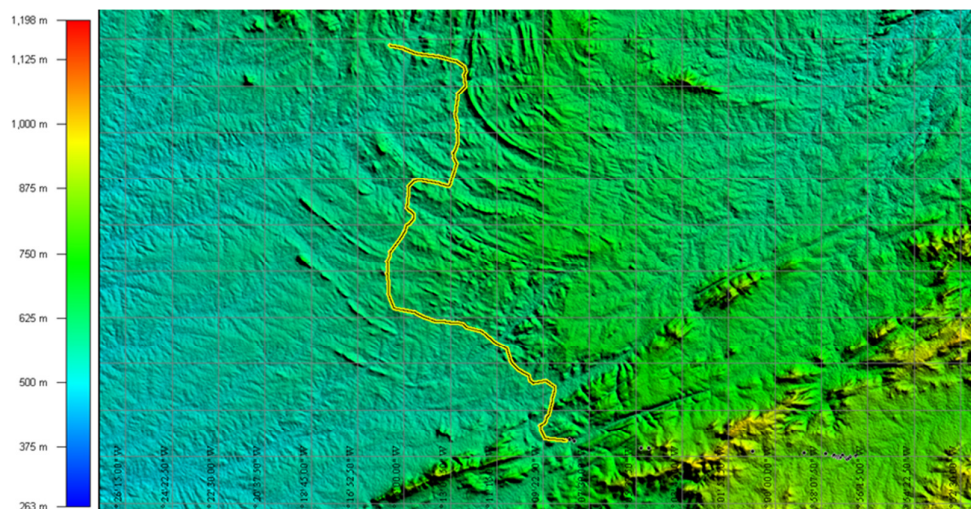


Figura 3 - Eixo dos Segmentos de Canal C1 a C11 no MDT obtido com os dados do RSTM/INPE

Porém, basicamente dois fundamentos garantem a admissibilidade do MDT: (i) A preservação do traçado planimétrico do eixo do canal proposto no Projeto Executivo; (ii) concernente à

altimetria, o fato de tanto a alternativa em análise como o traçado executivo estarem submetidos à mesma variabilidade do MDT do INPE em relação à realidade topográfica de campo.

Fazendo-se a comparação direta entre as cotas dos PI's do Projeto Executivo (segmentos de canal C1 ao C11) com os mesmos lançados no MDT do INPE verifica-se que o erro médio entre uma e outra base topográfica é da ordem de 7,16m, sendo que, quase sempre, as cotas retiradas do MDT superam às correspondentes retiradas dos perfis do Projeto Executivo. A Figura 4 apresenta uma comparação entre esses pares de PI's.

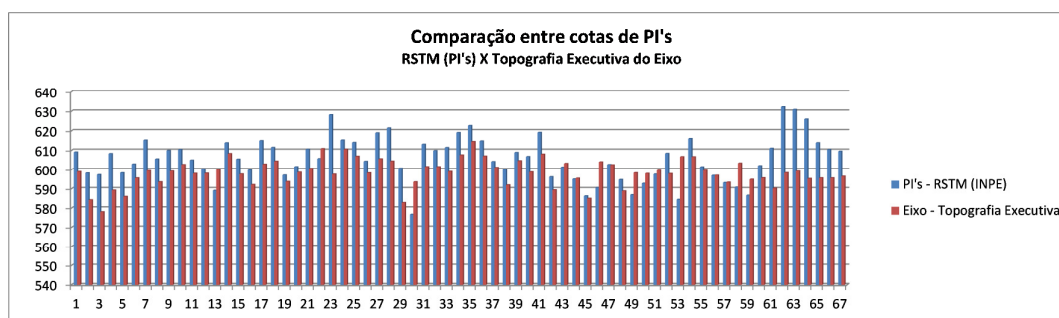


Figura 4 - Comparação entre as cotas dos PI's dos segmentos de canal C1 ao C11

### 1.1 – O traçado otimizado sem considerar interferências de infraestrutura

Em um primeiro momento, foram aplicados os algoritmos aludidos com vistas a obter um traçado otimizado sem se considerar as interferências de infraestrutura (rodovias, ferrovias, barragens, etc.) existentes na área. O objetivo foi verificar se seria possível um traçado otimizado entre os pontos de captação e entrega da água, sem que fosse necessário o desvio ou o ajuste da linha eixo do canal, para evitar que este interceptasse elementos infraestruturais existentes, demandando assim obras pontuais que viessem a encarecer a solução.

A Figura 5 mostra trecho do traçado otimizado (eixo representado pela linha azul com PI's assinalados em amarelo) obtido com a aplicação dos algoritmos. A área retratada está cerca de 1,2 km a jusante do ponto de travessia do vale, feita pelo aqueduto Boqueirão, previsto no Projeto Executivo. Outra interferência relevante é a BR 110 (Figura 6). Deixado livre para definir o traçado ótimo na faixa definida pelo algoritmo A\*, o algoritmo metaheurístico faz serpentear o traçado em torno da BR-110, implicando em três cruzamentos com aquela rodovia (pontos assinalados pelas setas vermelhas).

### 1.2 – O traçado considerando as interferências encontradas

Identificadas as principais interferências de infraestrutura à adoção do traçado ótimo, partiu-se então para os ajustes. O critério adotado visa apenas demonstrar a existência de traçado alternativo capaz de superar em economicidade, sem perda de eficiência técnica, nem tão pouco elevação dos custos operacionais do sistema, aquele previsto pelo Projeto Executivo. A Figura 7 compara os



traçados executivo e alternativo e evidencia), nos respectivos perfis, a realidade em termos de ocorrência de seções em corte e em aterro ao longo do trajeto.



Figura 5 - Barragem existente interferente no traçado ótimo (proximidades do Aqueduto Boqueirão)

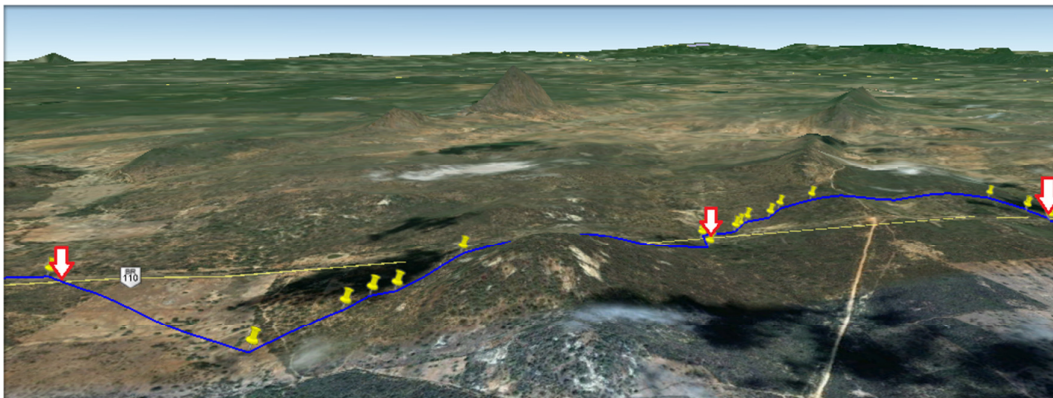


Figura 6 - Traçado otimizado (linha azul, PI's em amarelo) e as interferências com a BR 110

Chega a ser bastante perceptível nos perfis apresentados na Figura 7 a preponderância das seções em corte sobre as de aterro no traçado executivo. Um equilíbrio relativo superior é mostrado pelo perfil correspondente à alternativa proposta. Nesta, em se admitindo cortes na ordem 30 metros de profundidade, não há necessidade de construção de túneis.

O preço pago para se contornar as zonas de relevo mais acidentado, zonas essas que, no traçado executivo, são atravessadas retilineamente por túneis, é o aumento de comprimento do trajeto, que alcança cerca de 52 km, ou seja, aproximadamente 5 km a mais do que os 47,107km previstos no Projeto Executivo para se entregar a vazão no mesmo ponto.

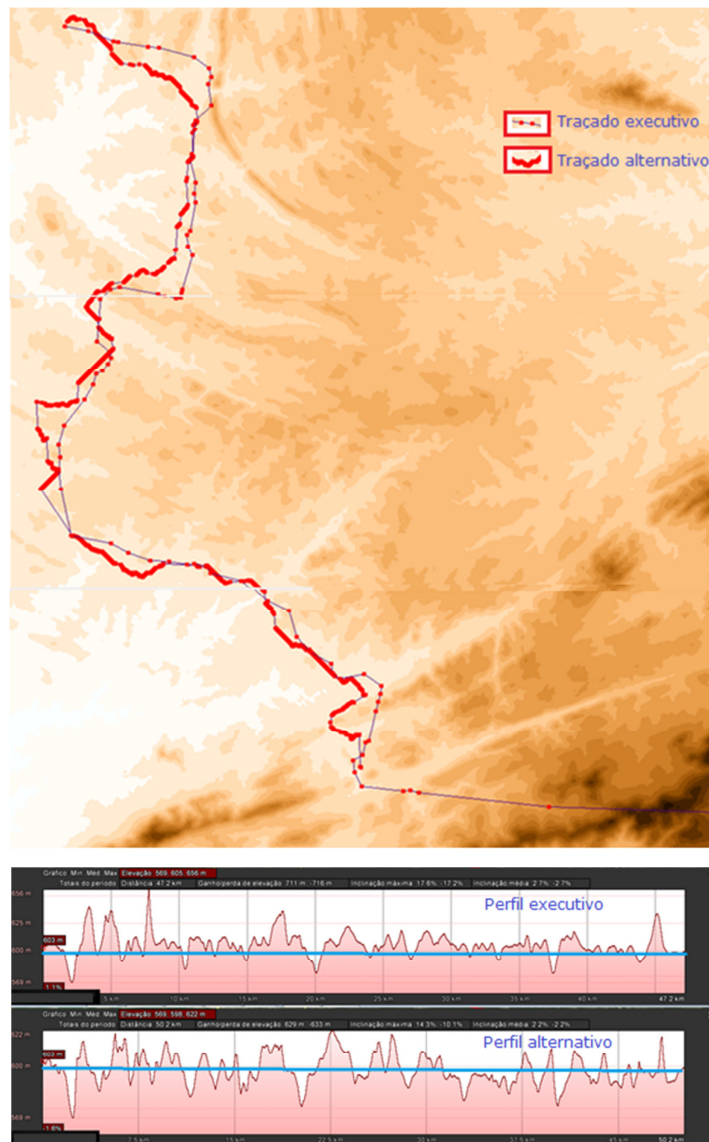


Figura 7 - Comparação entre os traçados executivo e alternativo

### 1.3 – Quantificações e Orçamentos

Com fito exemplificativo, traz-se na Figura 8 a representação gráfica do orçamento por estaca do segmento de canal C1 do traçado executivo, seguido do perfil topográfico correspondente (Figura 9). Já as Figuras 10 e 11 trazem o mesmo conteúdo, porém relativo ao traçado alternativo.

A observação dessas figuras revela a coerência entre o orçamento SIDOC e a realidade lógica da execução de obras de terraplenagem dessa natureza. Vejamos. No caso do Projeto Executivo, onde, a exemplo dos demais segmentos, o segmento C1 exhibe prevalência de seções em corte, os custos relativamente elevados dos cortes em relação aos aterros fazem com que a curva orçamentária feita estaca à estaca, ao longo do desenvolvimento do canal, apresente-se proporcional aos cortes, esses visíveis na Figura 11, onde foram traçadas as linhas de fundo e berma do canal.



Já no caso do traçado alternativo, para fins comparativos conservou-se a mesma escala usada nas figuras concernentes ao traçado executivo. Isso, com o objetivo de mostrar a economia advinda da adoção do conhecido critério de se procurar projetar o canal de maneira semienterrada, o que propicia menos escavação e tende a minimizar o momento de transporte e o bota-fora de material escavado.

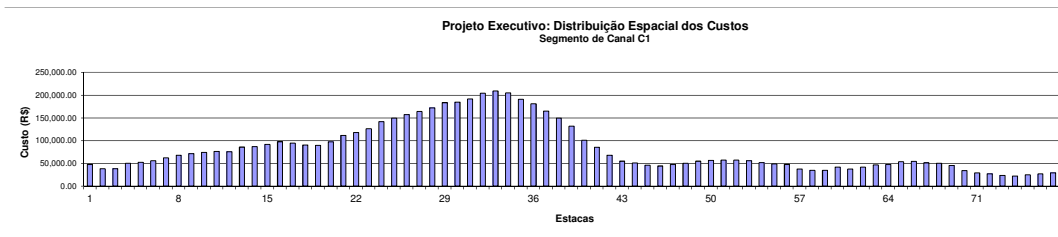


Figura 10 - Orçamento por estaca – Segmento de Canal C1 – Traçado executivo (RSTM/INPE)

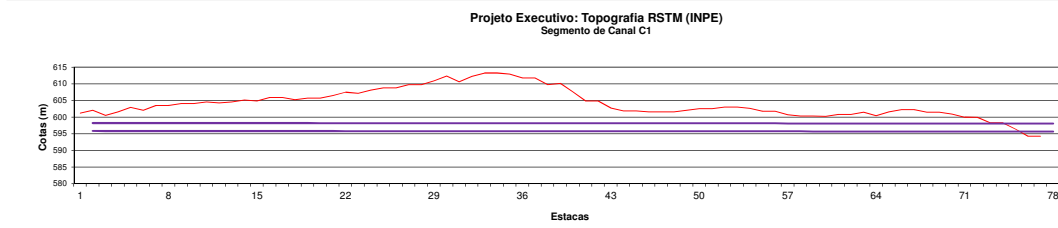


Figura 11 - Perfil longitudinal – Segmento de Canal C1 – Traçado executivo (RSTM/INPE)

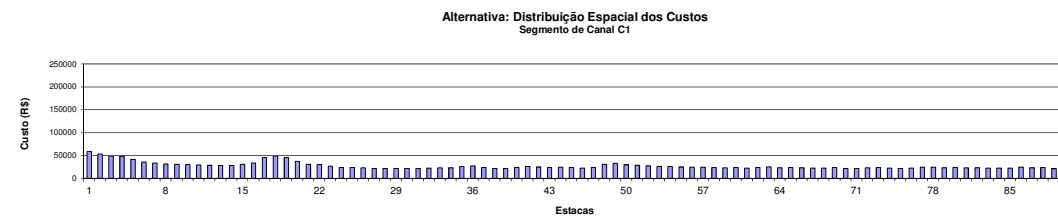


Figura 12 - Orçamento por estaca – Segmento de Canal C1 – Traçado alternativo (RSTM/INPE)

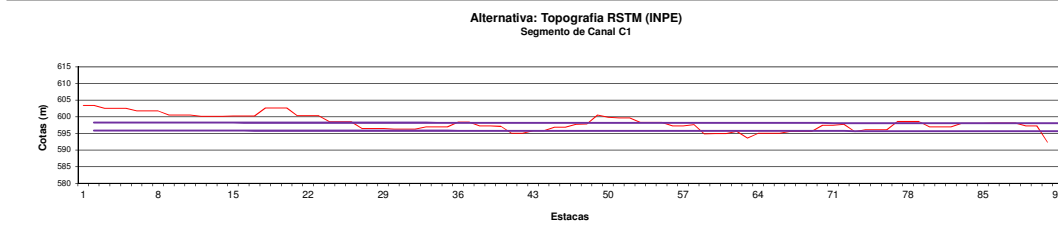


Figura 13 - Perfil longitudinal – Segmento de Canal C1 – Traçado alternativo (RSTM/INPE)

## 2 – CONCLUSÕES

A aplicação conjugada dos algoritmos descritos na primeira parte do presente artigo demonstrou incontestável vantagem enquanto ferramenta de apoio ao projeto de grandes obras de adução gravitaria envolvendo canais. No caso do Ramal do Agreste Pernambucano, uma comparação em termos percentuais (relativos) entre o traçado do projeto executivo e o traçado alternativo revelou um economia de custos de cerca de **22%**, em favor do traçado obtido com base

nos algoritmos conjugados (traçado alternativo), embora este seja um pouco mais longo do que o traçado executivo (cerca de 5 km a mais). Tal redução percentual de custos é constatável ainda que se abra mão de se fazer a comparação dos volumes dos itens de escavação de material de 1ª, 2ª e 3ª categorias, advindos do projeto refeito com base no MDT do RSTM/INPE (sabidamente superiores), e se lance mão os volumes constantes na planilha de quantitativos oficiais licitada pelo Governo Federal. O percentual mencionado não inclui os ganhos advindos com a eliminação dos túneis no início do traçado executivo, alternativa sugerida como mais atrativa pela aplicação dos algoritmos.

Em termos financeiros, a percentagem economizada corresponde a cerca de 70 milhões de reais, ou seja, um valor em torno de 6% do total orçado em nível de Projeto Executivo. Ao se confirmarem outras obras alternativas àquelas concebidas no projeto básico e detalhadas no projeto executivo, esse percentual poderá alcançar os 10% de economia, meta considerada excelente para os objetivos deste estudo.

Um fator, no entanto, pode reduzir significativamente esse ganho financeiro para a obra, dada a forma como foi considerado no projeto executivo, assim como o seu peso no valor global da obra e o grau de incerteza que envolve a determinação das suas quantidades. Trata-se do serviço de escavação de material de 3ª categoria e serviços associados (bota-fora e momento de transporte). De fato, a consideração das profundidades e, conseqüentemente, das espessuras e volumes desse material no Projeto Executivo é otimista quando se leva em consideração as observações feitas em campo e o conhecimento sobre a mesma questão em outros trechos do projeto da Transposição do Rio São Francisco.

## **BIBLIOGRAFIA**

MI-Ministério da Integração Nacional, (2012) *Ramal do Agreste: Relatório Final do Projeto Executivo - Sumário Executivo – Avanço do Projeto Executivo – Setembro 2012 1250-REL-5001-00-00-030 R1*. Brasília – DF.

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.