

OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO EM OBRAS RODOVIÁRIAS POR ALGORITMOS GENÉTICOS

Luís Fellipe Alves Silva

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Viviane Adriano Falcão

Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

A introdução de métodos inovadores na modernização das obras é recorrentemente cobrada à medida que o mercado sofre as consequências de uma obra mal planejada. Embora muito relevante, a prática dessa pauta ainda é negligenciada. Este trabalho tem como objetivo aplicar um software baseado em Algoritmos Genéticos na otimização de custos e prazos de uma obra rodoviária. As obras rodoviárias escolhidas para o estudo de caso foram importantes para criar diferentes orçamentos para cada etapa, com custos e prazos, de maneira que o software pudesse determinar as melhores combinações entre os orçamentos e resultar em valores quase ótimos. Ao executar os testes foi possível alcançar reduções da ordem de 8% para o custo e de três meses para o prazo total da obra. As ferramentas que utilizam Algoritmos Genéticos são muito promissoras para auxiliar profissionais na tomada de decisões para o desenvolvimento de um planejamento que atenda as necessidades construtivas.

ABSTRACT

The introduction of innovative methods in construction is recurrently charged as the market suffer the consequences of a poorly planned construction. Although very relevant, the practice of this guideline is still disregard. This work aims to apply a software based on Genetic Algorithms in the costs and deadlines optimization of a road construction. The road constructions picked to this case were important to create different budgets to each work's stage, with costs and deadlines, so the software could determinate the bests combinations between the budgets and result in near-optimal values. When executed the tests it was possible reach reductions in the order of 8% to cost and three months to construction deadline. The tools that use Genetic Algorithms are very promising to help professionals in decision makings to the development of a planning that attend the construction needs.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transporte têm uma grande importância para a promoção do desenvolvimento econômico de uma localidade, pois é através do escoamento de pessoas e de mercadorias que se movimenta economia. Nas obras rodoviárias brasileiras, é possível denotar a importância não só de realizar um planejamento como de buscar sua otimização. Essa necessidade parte da relevância que as rodovias têm para o país: segundo Campos Neto *et al.* (2011) mais de 70% das cargas gerais que circulam no Brasil são transportadas pelas rodovias.

Além disso, Morais e Falcão (2017) expressam que os estudos das obras viárias são recomendáveis para o progresso de uma região, pois o aumento na oferta de transportes traz desenvolvimento econômico através do comércio, empregos e circulação de tecnologia. Um planejamento eficiente e otimizado se torna muito interessante para diminuir o tempo, e principalmente os custos, de maneira que possam ser investidos em expansões e melhorias contínuas em infraestrutura de transportes. Nesse sentido, o planejamento de obras viárias, através de algoritmos genéticos, pode auxiliar os seus responsáveis a gerar soluções de elevada qualidade, reduzindo os tempos de planejamento.

A complexidade e a natureza incerta dos projetos de construção podem se utilizar das técnicas de otimização para avaliar a relação inversamente proporcional entre o custo e o tempo de um projeto e para encontrar um *trade-off* adequado entre esses dois elementos-chave (Salimi *et al.*, 2018). Farazmand e Beheshtinia (2018), afirmam ainda que as competições entre as empresas fazem com que os gerentes tentem minimizar o tempo de projeto, custo, emissão de dióxido de carbono e ao mesmo tempo maximizar a qualidade do projeto.

Nesse contexto, é interessante trazer uma perspectiva de otimização de obras viárias, com a utilização de *softwares* baseados em Algoritmos Genéticos, capazes de trabalhar com a readequação das etapas, redução de tempo e custos. Há muitos estudos e trabalhos que aplicam algoritmos genéticos em obras como exemplo: Hegazy e Wassef (2001), Hyari e El-Rayes (2004), El-Rayes e Kandil (2005), Hyari e El-Rayes (2006), Senouci e Al-Derham (2008), Moselhi e Alshibani (2009), Long e Ohsato (2009), Salimi *et al.* (2018) porém somente Hegazy (2005) se preocupou em aplica-los em projetos reais.

O objetivo desse trabalho é, através da utilização de Algoritmos Genéticos (AGs), otimizar custos e prazos de uma obra rodoviária e apresentar opções de planejamentos economicamente mais viáveis para a realização da obra.

2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Goldberg (1989) e Linden (2012) caracterizam os Algoritmos Genéticos (AGs) como algoritmos de busca que se baseiam nos mecanismos da genética natural e da evolução dos seres, através da ideia de sobrevivência dos mais aptos. Senouci e Al-Derham (2008) complementam que os AGs são ferramentas que auxiliam na tomada de decisões relacionadas a problemas que tenham um grande campo de busca. A solução de um problema através da utilização de AGs, de acordo com Gestal *et al.* (2013), parte de uma população de indivíduos gerada de forma aleatória, em que cada indivíduo representa uma solução para o problema. Valencia (1997) aprofunda o conceito de indivíduo como sendo um ponto de busca em um campo de soluções potenciais, que é avaliado e classificado segundo sua aptidão.

2.1. Algoritmos Genéticos na Construção Civil

El-Rayes e Kandil (2005) desenvolvem em seu artigo um modelo capaz de otimizar projetos de obras rodoviárias utilizando AGs, cujo objetivo é minimizar os custos e o tempo e maximizar a qualidade através do fornecimento de planos ideais de utilização de recursos. Hegazy (2005) também propõe um modelo de otimização de projetos de obras rodoviárias utilizando AGs, através do *software* Evolver. Os resultados apresentados no cronograma otimizado forneceram uma economia de aproximadamente mais de 19% do custo total.

Como forma de contemplar o estudo de atividades repetitivas, Hegazy e Wassef (2001) apresentam em seu trabalho um modelo que utiliza Algoritmos Genéticos para determinar o custo mínimo global da construção em questão. Para o estudo de caso do trabalho, que vale ressaltar é um exemplo da literatura, o custo e tempo totais da obra antes da otimização eram de US\$ 453.933,00 e 49 dias. Após a otimização, a melhor solução encontrada apresentou uma redução de US\$ 66.733,00 e 12 dias no custo e tempo globais, respectivamente.

Diferente da grande parte dos estudos, que são capazes de otimizar apenas um objetivo de cada vez (ou seja, minimizar a duração ou o custo), Hyari e El-Rayes (2004) apresentam o desenvolvimento de um modelo para otimizar a utilização de recursos em projetos de infraestrutura repetitivas. Ele fornece a capacidade de minimização simultânea da duração do projeto e das interrupções de trabalho para equipes de construção. O modelo incorpora um algoritmo genético multiobjetivo e um algoritmo de escalonamento. O modelo de otimização de Hyari e El-Rayes (2006) é multiobjetivo para o planejamento de projetos de construção repetitivos. O modelo possibilita aos planejadores gerar e avaliar os planos de construção que minimizam a duração do projeto e maximizam a continuidade do trabalho da equipe, simultaneamente. Por fim, eles aplicam o modelo em um exemplo da literatura.

Todos os trabalhos analisados anteriormente, basearam-se no Problema de Escalonamento de Projetos. O modelo de Moselhi e Alshibani (2009) pode ser considerado diferente dos demais, ele utiliza duas técnicas de otimização, Algoritmo Genéticos, Programação Linear e o SIG. Ele tem como objetivo a otimização das operações de terraplenagem em projetos de construção pesada. O Algoritmo Genético é usado para gerar diferentes cenários de formações de equipe técnica e para procurar soluções próximas da ótima.

Long e Ohsato (2009) utilizaram Algoritmos Genéticos e um algoritmo de escalonamento para otimizar o planejamento de projetos repetitivos, tanto do ponto de vista da duração quanto do custo, separadamente ou em conjunto. O exemplo da literatura é analisado para validar o método proposto, além de outro exemplo para ilustrar sua capacidade no planejamento de um projeto.

Agrama (2012) apresenta uma abordagem para um modelo multiobjetivo de otimização para planejar obras lineares. O modelo permite que os planejadores criem cronogramas de construção ótimos que minimizem a duração do projeto, o total de interrupções de trabalho e o número total de equipes. O modelo é otimizado, combinando uma abordagem por soma ponderada e por algoritmos genéticos, através do software Evolver.

Falcão *et al.* (2016a) estabeleceram um *survey* com os principais estudos que aplicaram técnicas de otimização em obras de construção rodoviária, nesse estudo, que pode ser considerado atual, os autores enfatizam que a maioria dos trabalhos na área não aplicam as técnicas de otimização em projetos reais (Falcão *et al.*, 2016b), o que os tornam pouco fiáveis para os engenheiros do campo.

3. ESTUDO DE CASO

A obra rodoviária escolhida para o estudo de caso foi objeto de estudo de Alencar (2018), aqui neste trabalho denominada “ROD-01”. Em seu estudo, a autora analisa e apresenta resultados acerca do impacto do uso da técnica de linha de balanço no gerenciamento da cadeia produtiva de uma obra rodoviária. O foco do presente trabalho, porém, não é fazer uma abordagem semelhante ou acerca do mesmo tema. Do estudo de Alencar (2018) utilizou-se o cronograma físico-financeiro pela linha de balanço, além de informações sobre composições, etapas da obra, pacotes de serviço e suas respectivas atividades, prazos de execução, entre outras considerações. A obra foi dividida em duas frentes, nomeadas como Frente 01 e Frente 02, cada qual com seu trecho de execução, que será apresentado mais adiante. Para este trabalho, escolheu-se trabalhar apenas com a Frente 01, em razão da quantidade de informações para tratar, analisar e inserir no programa.

Além disso, para execução da otimização do planejamento, foi utilizado um programa já desenvolvido e disponibilizado de forma gratuita. O *software* em questão é o *EasyPlan*, desenvolvido por Tarek Hegazy, docente na Universidade de Waterloo.

3.1. Metodologia para determinação dos dados utilizados no estudo de caso

A execução do estudo de caso, que, em suma, tem a intenção de otimizar o planejamento da obra escolhida, depende de algumas informações cruciais. Para dar entrada no programa é necessário, por exemplo, conhecer as etapas que serão otimizadas, suas relações de precedência, as datas em que o planejamento prevê que serão executadas e seus respectivos custos desmembrados, isto é, preços por etapa. A intenção do estudo é avaliar a otimização proposta por um programa em Algoritmo Genético, que em sua estrutura oferece espaço para inserir até três orçamentos (custo e prazo) diferentes para uma mesma etapa, além de possuir a possibilidade de inserir até três recursos (entre equipamentos, materiais, equipes, mão-de-obra e subempreiteiros) que poderão ser limitados e otimizados também. Para que a proposta de otimização fosse mantida, isto é, para que o programa conseguisse otimizar os custos da obra, foi necessário estimar, então, um segundo e um terceiro orçamento hipotéticos para algumas das atividades do cronograma físico-financeiro da obra da ROD-01. Ou seja, além dos custos e tempos de execução apresentados no cronograma físico-financeiro da ROD-01, foi necessário estabelecer, para algumas das etapas, outros custos e tempos de execução, de forma que pudessem ser considerados como “outros orçamentos”.

Dessa maneira, para construir o segundo e o terceiro orçamento para as atividades da obra rodoviária, tomou-se duas outras obras rodoviárias com atividades iguais ou suficientemente próximas daquelas apresentadas na obra do estudo. As obras escolhidas foram a da ROD-02, que foi objeto de estudo de Ribeiro Neto (2017), e da ROD-03, cujas informações puderam ser encontradas em documento elaborado por empresa terceirizada e disponibilizado pelo DNIT (2010) em seu endereço eletrônico. As informações das três obras envolvidas no presente trabalho estão detalhadas abaixo.

a) Rodovia: ROD-01 – Objeto do estudo de caso – Orçamento 1 (ALENCAR, 2018)

- Trechos da obra: Frente 01 (km 291,98 ao km 343,24); Frente 02 (km 342,24 ao km 395,36);
- Data base do orçamento: Janeiro de 2016

b) Rodovia: ROD-02 – Componente utilizada para formar Orçamento 2 (RIBEIRO NETO, 2018)

- Trecho da obra: entre a BR-101 e o entroncamento da PE-096 (32,20km)
- Data base do orçamento: Março de 2009

c) Rodovia: ROD-03 – Componente utilizada para formar Orçamento 3 (DNIT, 2010)

- Trecho da obra: km 536,732 ao km 539,710
- Data base do orçamento: Maio de 2010.

3.2. Resultados e Discussão

Embora o *software* apresente uma série de opções relacionadas a multas, juros, incentivos e custos indiretos, preferiu-se, majoritariamente, explorar a otimização sem inserir maioria desses valores, como forma de demonstrar mais claramente a otimização incorrida principalmente entre os prazos e custos dos orçamentos formados. Definiu-se, então, um cenário para ser testados no *software*:

Cenário A. Nessa abordagem não há inclusão de custos por dinâmica da obra (juros, multas, incentivos, etc:).

3.3. Cenário A – Abordagem sem Inclusão de Custos por Dinâmica da Obra

Neste caso, conforme explicado anteriormente, não foram incluídos nos testes quaisquer dados de juros e multas por atraso, nem incentivos por adiantamentos, e nem qualquer outro custo/desconto a ser aplicado de acordo com a dinâmica da obra. O custo total antes da otimização é a soma simples dos custos das etapas apresentados nas colunas “*Cheap Estimate*”, ou seja, os custos totais do Orçamento 1. Neste cenário o prazo estabelecido foi de 111 dezenas de dias (37 meses), o mesmo prazo total apresentado pelo Orçamento 1.

Ao trabalhar com o programa, é necessário que pelo menos um dos orçamentos seja completo, isto é, que possua um custo para cada etapa/atividade inserida. Além disso, foi inserida na “*Start Date*” (Data de início) uma data genérica, visto que cada dia no programa será interpretado neste trabalho como uma dezena de dias (10 dias). Logo, todas as unidades de prazo trabalhadas no programa (*deadline e duration*) serão interpretadas em dezenas de dias. A informação apresentada em “*Project End Date*” poderá, então, ser ignorada neste caso.

Para o Cenário A, a otimização foi realizada com 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 ciclos. Para cada teste, tomou-se a planilha base. Por exemplo, após realizar a otimização com 100 ciclos, não foi realizada uma segunda otimização de 100 ciclos na planilha já otimizada para formar a otimização de 200 ciclos (100+100 ciclos). Tomou-se novamente a planilha sem otimização e aplicou-se uma otimização de 200 ciclos, e assim por diante, até a otimização com 1000 ciclos. Cada um dos testes apresentou uma nova proposta de custo total e prazo para finalização da obra, através do trabalho, em AGs, de combinação e mutação das opções, até encontrar uma opção mais viável dentro do total de ciclos determinado. Assim, cada um dos testes não gerou apenas um novo custo e um novo prazo, mas também um novo cronograma físico-financeiro. A Tabela 1 contém o custo total da obra após a otimização para cada teste realizado, bem como o tempo total apontado pelo *software*.

Tabela 1: Custos e prazos totais dos testes realizados

Nº do Teste	Teste	Custo total otimizado	Redução do custo (%)	Tempo total de execução (dezenas de dias e meses)	Redução do tempo (%)
1	100 ciclos	R\$ 60.824.771,96	0,00	111 (37 meses)	0,00
2	200 ciclos	R\$ 60.256.216,36	0,93	104 (34 meses e 20 dias)	6,31
3	300 ciclos	R\$ 60.038.774,66	1,29	106 (35 meses e 10 dias)	4,50
4	400 ciclos	R\$ 60.094.153,88	1,20	106 (35 meses e 10 dias)	4,50
5	500 ciclos	R\$ 59.985.028,91	1,38	105 (35 meses)	5,41
6	600 ciclos	R\$ 59.994.716,09	1,36	106 (35 meses e 10 dias)	4,50
7	700 ciclos	R\$ 59.877.451,18	1,56	109 (36 meses e 10 dias)	1,80
8	800 ciclos	R\$ 59.962.976,68	1,42	107 (35 meses e 10 dias)	3,60
9	900 ciclos	R\$ 59.888.056,85	1,54	107 (35 meses e 10 dias)	3,60
10	1000 ciclos	R\$ 59.962.976,68	1,42	107 (35 meses e 10 dias)	3,60

Alguns dos testes podem ser inteiramente comparados a outros, de maneira a eliminar um deles por apresentar total desvantagem em relação ao outro. Para fazer a comparação, cada teste foi comparado aos demais testes, manualmente, com o critério resumido na Figura 1.

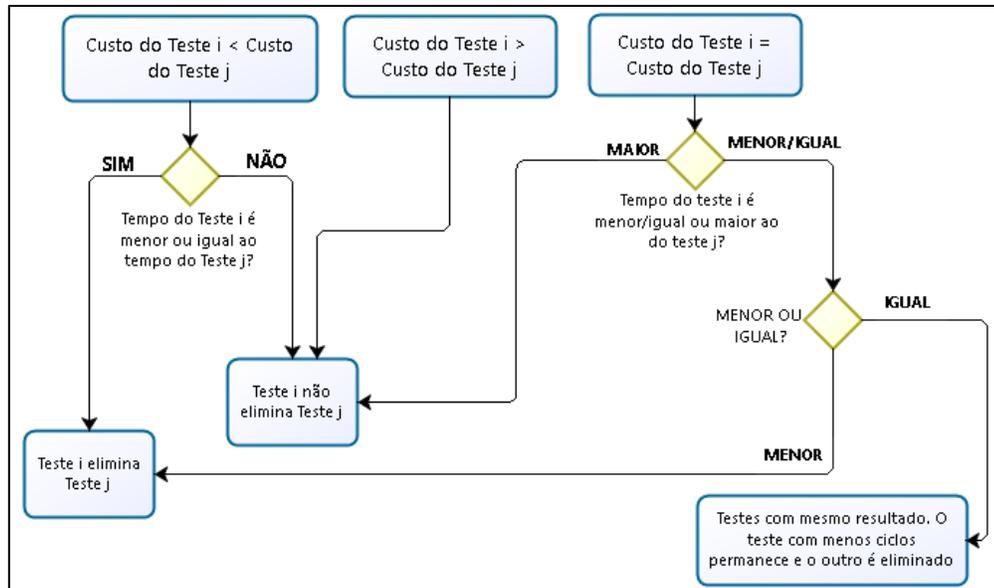


Figura 1: Critério para eliminação de testes

Dessa maneira, os testes 1, 3, 4, 6, 8 e 10 foram eliminados da análise, pois, em comparação a outros testes, se apresentaram em total desvantagem em relação a custos totais e tempo de execução da obra. Em uma situação em que a empresa precisa escolher entre os testes realizados, os testes eliminados são descartados por critérios básicos, e auxiliam na tomada de decisão, pois permitem que permaneçam somente os testes que apresentem possíveis soluções para o orçamento quase ótimo. A partir de então, a empresa poderá utilizar critérios mais complexos para determinar quais das soluções remanescentes escolher. A Tabela 2 traz o comparativo entre os resultados de custo e tempo dos testes remanescentes.

Tabela 2: Comparativo entre os resultados dos testes 2, 5, 7 e 9

Testes	Teste 2	Teste 5	Teste 7	Teste 9
Custo global antes (R\$)	60.824.771,96	60.824.771,96	60.824.771,96	60.824.771,96
Custo global depois (R\$)	60.256.216,36	59.985.028,91	59.877.451,18	59.888.056,85
Redução custo (R\$)	568.555,60	839.743,05	947.320,78	936.715,11
Redução custo (%)	0,93%	1,38%	1,56%	1,54%
Tempo global antes	111,00 dez. de dias	111,00 dez. de dias	111,00 dez. de dias	111,00 dez. de dias
Tempo global depois	104,00 dez. de dias	105,00 dez. de dias	109,00 dez. de dias	107,00 dez. de dias
Redução (dez de dias e meses/dias)	7,00 dez. 2 meses e 10 dias	6,00 dez. 2 meses	2,00 dez. 20 dias	4,00 dez. 1 mês e 10 dias
Redução %	6,31%	5,41%	1,80%	3,60%

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que os testes 2 e 7 geraram os resultados com menor prazo e menor custo, respectivamente. Para o teste 2, há uma redução total

de sete dezenas de dias, correspondente a dois meses e dez dias ou 6,31% do tempo total previsto apenas pelo Orçamento 1. Para este mesmo teste, a redução no custo é de R\$ 568.555,60, ou 0,93%. Para o teste 7, gerado com 700 ciclos, a redução nos custos é de R\$ 947.320,78, ou 1,56% e no tempo, 20 dias. Tomando-se como base o teste executado com 1000 ciclos, pode-se afirmar que aumentar a quantidade de ciclos nem sempre apresentará melhores resultados em relação aos de ciclos mais baixos. Em alguns casos, porém, trabalhar com diferentes ciclos se torna interessante para garantir que o *software* explore mais populações com possíveis soluções. O intuito de apresentar dez diferentes números de ciclos neste trabalho, então, é evidenciar a forma como Algoritmos Genéticos trabalham. Diferentes testes são capazes de gerar diferentes resultados de otimização, uma vez que os AGs possuem a propriedade de criar campos de soluções e, em cada campo, explorar as possíveis combinações mais adequadas ao que se pretende alcançar.

Para análise mais profunda, então, foram escolhidos os testes 2 e 7 responsáveis por apresentar os melhores resultados de tempo e de custos, respectivamente. Os orçamentos escolhidos para cada etapa no teste 2 estão resumidos na Figura 2. Nas linhas do quadro estão todas as 42 etapas consideradas na otimização. As colunas indicam o orçamento escolhido para cada teste, a dezena de início e de fim da etapa.

ETAPAS	ORÇ.	DEZ. INÍCIO	DEZ. FIM	ETAPAS	ORÇ.	DEZ. INÍCIO	DEZ. FIM
Serviços Prelim. 1	1	1	3	Pavimentação 2ª - 3	1	40	45
Serviços Prelim. 2	1	4	18	Pavimentação 2ª - 4	1	46	51
Serviços Prelim. 3	1	19	33	Pavimentação 2ª - 5	1	52	57
Serviços Prelim. 4	1	34	48	Pavimentação 2ª - 6	1	58	63
Terraplenagem 1	1	4	6	Pavimentação 2ª - 7	1	65	70
Terraplenagem 2	1	7	18	Pavimentação 2ª - 8	1	72	77
Terraplenagem 3	1	19	33	Pavimentação 2ª - 9	1	79	84
Terraplenagem 4	1	34	48	Pavimentação 2ª - 10	1	86	91
Terraplenagem 5	1	49	63	OAC 1	1	1	3
Pavimentação 1ª - 1	2	19	25	OAC 2	2	4	11
Pavimentação 1ª - 2	2	26	32	OAC 3	1	12	26
Pavimentação 1ª - 3	2	33	39	OAC 4	2	27	37
Pavimentação 1ª - 4	1	40	45	OAC 5	1	38	52
Pavimentação 1ª - 5	1	46	51	OAC 6	1	53	67
Pavimentação 1ª - 6	1	52	57	Drenagem Profunda 1	3	46	57
Pavimentação 1ª - 7	2	58	64	Drenagem Profunda 2	1	58	69
Pavimentação 1ª - 8	2	65	71	Drenagem Profunda 3	3	70	81
Pavimentação 1ª - 9	2	72	78	Drenagem Profunda 4	1	85	96
Pavimentação 1ª - 10	2	79	85	Drenagem Superficial	1	78	92
Pavimentação 2ª - 1	1	26	31	Sinalização	1	78	92
Pavimentação 2ª - 2	1	33	38	Revest. Vegetal	1	93	104

Figura 2: Quadro com orçamentos escolhidos e períodos de execução para o resultado do Teste 2

O resultado obtido pelo teste 2 evidencia algumas alterações ocorridas na otimização. Por exemplo, as Pavimentações 1ª fase 1, 2, 3, 7, 8, 9 e 10 passaram a utilizar o custo e tempo do orçamento 2. Em relação ao orçamento 1, o tempo de cada uma destas etapas no orçamento 2 é dez dias maior. O teste 2, como apresentado anteriormente, foi o teste cujo tempo total da execução da obra foi o menor, totalizando 104 dezenas de dias, ou 34 meses e 20 dias. Logo, é possível perceber que o *software* não necessariamente escolhe somente as opções de orçamento cujo tempo seja menor, para atingir um tempo global menor. Através da otimização por Algoritmo Genético, o *software* compara as combinações dentro das populações de possíveis soluções geradas. Portanto, o resultado apresentado é o próximo do ótimo, com uma determinada combinação de orçamentos,

ora com custos mais altos, ora com custos mais baixos, e o mesmo acontecendo para o tempo de execução.

Etapas como as de Obras de Arte Corrente passaram a ser iniciadas mais cedo, no primeiro mês de obra. Além disso, o tempo reduzido de sete dezenas de dias (dois meses e dez dias) pode ser analisado percorrendo-se o caminho inverso da rede da obra. O *software* indica, no diagrama de rede, este caminho. Partindo-se da última etapa, Revestimento Vegetal, que é a única etapa que se finaliza junto com a finalização da obra, é possível verificar quais etapas causaram alteração no tempo global da obra, conforme indicado pelo resultado obtido. Esta etapa tem como predecessora as Drenagens Profunda 3 e Superficial. Entretanto, grande parte da otimização foi causada pelo tempo de atraso de início de seis dezenas de dias (dois meses) inserida antes de otimização. O *software* reconheceu que não havia quaisquer impedimentos para que a etapa de Revestimento Vegetal se iniciasse antes, uma vez que sua predecessora mais tardia, Drenagem Superficial, terminava na dezena 92. Assim, ao reduzir os dois meses, a etapa seria iniciada na dezena 94, mas por conta da sua predecessora mais tardia, passou-se a iniciar dez dias mais cedo, na dezena 93.

É importante frisar que os dois meses de atraso de início da etapa estavam programados pelo Cronograma Físico-Financeiro da Obra da ROD-01. Nenhuma outra informação foi fornecida ao *software* para que houvesse impedimento em cortar os dois meses de atraso. Entretanto, em um caso real, uma empresa poderá apresentar limitações em suas equipes, de maneira que, pelo planejamento da obra, seja necessário começar mais tardiamente. Isso pode ocorrer, por exemplo, em casos onde a empresa trabalhará com diferentes obras ao mesmo tempo. Duas etapas de obras diferentes que exijam as mesmas equipes podem exceder a demanda de alguns equipamentos e mão-de-obra caso sejam programadas para o mesmo período. Dessa maneira, caberá a empresa a medir, junto com a otimização das etapas, o número de equipamentos e pessoal disponíveis, de forma que os recursos sejam suficientes e não causem atrasos no planejamento. Este trabalho não entrará nesse nível de detalhamento.

Além disso, o resultado deste teste também apresentou uma redução de custo global da obra. Essa redução foi causada, basicamente, pela escolha do orçamento 2 nas pavimentações 1ª fase de 1 a 3 e de 7 a 10. Para as demais etapas em que foram utilizados os orçamentos 2 ou 3, os custos foram maiores, portanto, não surtiram efeito positivo de redução do custo global.

O teste 7, ao ser analisado, apresentou um resultado cujo tempo e custo global foram reduzidos, em relação ao planejamento inicial. A figura 3 traz os orçamentos escolhidos pelo programa, bem como os períodos de execução das etapas após a otimização.

ETAPAS	ORÇ.	DEZ. INÍCIO	DEZ. FIM	ETAPAS	ORÇ.	DEZ. INÍCIO	DEZ. FIM
Serviços Prelim. 1	1	1	3	Pavimentação 2ª - 3	1	40	45
Serviços Prelim. 2	1	4	18	Pavimentação 2ª - 4	1	47	52
Serviços Prelim. 3	1	19	33	Pavimentação 2ª - 5	1	54	59
Serviços Prelim. 4	1	34	48	Pavimentação 2ª - 6	1	61	66
Terraplenagem 1	1	4	6	Pavimentação 2ª - 7	1	68	73
Terraplenagem 2	1	7	18	Pavimentação 2ª - 8	1	75	80
Terraplenagem 3	1	19	33	Pavimentação 2ª - 9	1	82	87
Terraplenagem 4	1	34	48	Pavimentação 2ª - 10	1	89	94
Terraplenagem 5	1	49	63	OAC 1	1	1	3
Pavimentação 1ª - 1	2	19	25	OAC 2	1	4	15
Pavimentação 1ª - 2	2	26	32	OAC 3	1	16	30
Pavimentação 1ª - 3	2	33	39	OAC 4	1	31	45
Pavimentação 1ª - 4	2	40	46	OAC 5	1	46	60
Pavimentação 1ª - 5	2	47	53	OAC 6	1	61	75
Pavimentação 1ª - 6	2	54	60	Drenagem Profunda 1	1	46	63
Pavimentação 1ª - 7	2	61	67	Drenagem Profunda 2	1	64	75
Pavimentação 1ª - 8	2	68	74	Drenagem Profunda 3	1	76	93
Pavimentação 1ª - 9	2	75	81	Drenagem Profunda 4	1	94	105
Pavimentação 1ª - 10	2	82	88	Drenagem Superficial	2	81	97
Pavimentação 2ª - 1	1	26	31	Sinalização	2	81	96
Pavimentação 2ª - 2	1	33	38	Revest. Vegetal	1	98	109

Figura 3: Quadro com orçamentos escolhidos e períodos de execução para o resultado do Teste 7

O resultado gerado pelo teste 7 não apresenta nenhuma etapa cujo orçamento escolhido pelo programa seja o orçamento 3. Ainda assim, o resultado do teste 7 é aquele que apresenta maior redução de custos se comparado ao orçamento inicial. Essa redução ocorre em razão da utilização do orçamento 2 em todas as pavimentações 1ª fase e nas etapas de Drenagem Superficial e Sinalização. Para todas estas etapas, os custos apresentados no orçamento 2 são menores que os do orçamento inicial (orçamento 1). Quando comparado ao teste 2, anteriormente analisado, a redução de custos é bem mais expressiva para os resultados do teste 7. Por outro lado, a redução no tempo global da obra é bem menor, ficando em 20 dias, neste caso. Como é possível notar, ao escolher orçamentos com custos razoavelmente menores para algumas das etapas, escolhe-se junto tempos de execução maiores. Isso impede, por exemplo, que a redução de tempo global da obra seja muito expressiva, como aconteceu no resultado do teste 2. Na formação dos orçamentos 2 e 3, para os custos de etapas que são maiores que os custos do orçamento 1, os tempos adotados foram menores que no orçamento 1. Já para custos menores, os tempos adotados foram maiores. Logo, observa-se essa tendência nos resultados particulares desta análise: onde há expressivas reduções no custo global da obra, não há grandes reduções no tempo global, enquanto onde há grandes reduções no tempo, há não tão expressivas reduções no custo global.

3.4. Análise Geral dos Resultados

Os testes foram realizados até um número delimitado de ciclos. Não há, porém, uma regra para determinar quantas vezes os testes devem ser realizados. Para cada número de ciclos, o *software* oferecerá uma solução próxima da ótima, constante na população de possíveis soluções geradas para o dado número de ciclos. Os critérios devem ser estabelecidos de acordo com o usuário e as necessidades da otimização. Sendo assim, para diferentes testes, poderão aparecer diferentes resultados, como foi o caso apresentado neste estudo. E, como também denotado, o critério básico de eliminação de alguns testes não foi capaz de eliminar todos os resultados, de maneira a oferecer apenas um deles como possível solução. Ao observar os resultados como os aqui fornecidos, uma

empresa responsável por planejar e/ou executar a obra rodoviária precisará avaliar quais combinações de custo e tempo favorecem a rodovia em questão. Embora enfatizados, os resultados com menor custo e menor prazo não necessariamente podem ser os mais atrativos. É necessário estabelecer critérios prévios para, então, poder escolher entre os resultados aquele que é mais interessante de ser aplicado. Para isso é necessário realizar um estudo de impacto que inclua fatores importantes a serem analisados. Por exemplo, a previsão do clima nos meses da obra poderá influenciar na escolha de um resultado cujo tempo global seja reduzido, para evitar ir de encontro a condições climáticas desfavoráveis. É importante ressaltar que o estudo apresentado aqui não incluiu fatores relacionados ao clima, mas o *software* permite que esses fatores sejam incluídos.

Há também outros fatores importantes como: quais outros gastos serão incorridos para que a rodovia passe por uma obra? Que tipo de impacto será gerado no transporte de pessoas e de cargas? Que tipo de cargas serão transportadas por essa rodovia? Há alguma outra rodovia que passará a receber o escoamento de veículos temporariamente, principalmente os pesados, de maneira que tal rodovia tenha seu processo de depreciação acelerado, no caso de obras de recuperação? Se houver, qual o impacto financeiro relativo ao desgaste de outras rodovias? Como a rodovia em obras impactará social e economicamente na região em que se encontra? Haverá impactos globais? Todos esses questionamentos são importantes para formar um estudo, ainda que básico, que auxilie na determinação do melhor resultado de otimização.

Neste cenário, um planejamento eficiente e utilizando, por exemplo, Algoritmos Genéticos, é capaz de reduzir o tempo total de obra e garantir que a rodovia passe a funcionar antes do previsto. Nesse panorama, a comercialização de produtos brasileiros com outros países e até mesmo entre pontos do Brasil pode sofrer impactos significativos.

4. CONCLUSÕES

As rodovias apresentam importância primordial no cenário brasileiro. Em uma realidade em que as rodovias são responsáveis por transportar 70% das cargas gerais do país e em que são peças-chave no desenvolvimento regional, pensar em formas de otimização do planejamento se torna necessidade. Embora as reduções de tempo e custo apresentadas não sejam, de certa forma, muito elevadas, quando comparadas ao custo e ao tempo iniciais, os valores economizados são passíveis de gerar um impacto em todo o processo, quando se considera que outras obras rodoviárias são realizadas todo ano. Por isso, cabe à situação depender de um tempo para analisar otimizações como as apresentadas, como maneira de garantir a população a entrega de uma obra de qualidade. Ainda que pequenas porcentagens tenham sido poupadas nos números apresentados, é necessário enxergar de forma macro. Há grande necessidade de garantir que as rodovias atendam ao fluxo de veículos por um tempo de vida adequado. E ainda que em pequenas porções, otimizar custos e tempo de obra podem aumentar a possibilidade de investimentos em níveis de serviço melhores, que atendam a grande demanda de produtos e pessoas que circulam diariamente pelas rodovias. Além disso, é possível oferecer vias cada vez mais adequadas para não só comportar a necessidade atual, como também para se adequar a novas modalidades de transporte que, somadas às rodovias, poderão transformar a realidade da logística brasileira. Embora o estudo tratado neste trabalho tenha se limitado em alguns pontos, como a construção hipotética de dois orçamentos, as limitações impostas pelo *software* e a quantidade de dados tratados, um dos intuitos foi demonstrar que os Algoritmos Genéticos, e a tecnologia em geral, podem ser aplicados em favor da otimização do

planejamento de obras rodoviárias na prática, e cada vez melhor, à medida que as ferramentas e o campo de estudo sejam expandidos e difundidos.

Planejamentos ineficientes são causas de etapas que levam muito mais tempo do que realmente levariam caso fossem repensadas e montantes de custos de obra altamente elevados. É comum encontrar obras, principalmente ligadas ao público e coletivo, que se estendem muito além dos prazos estabelecidos, por falta de um planejamento eficiente, de ferramentas adequadas às exigências do mercado e às atualizações de outros setores que não o da construção civil. Os Algoritmos Genéticos têm se mostrado bastante eficazes nesse cenário, pois apresentam soluções muito próximas das ótimas em diversas áreas, incluindo a construção civil.

Em relação ao objetivo do estudo, os resultados apresentados foram satisfatórios, tanto em otimizar custos e prazos da obra através da combinação de diferentes estimativas, os orçamentos, e também quanto a oferecer resultados capazes de serem comparados àqueles inicialmente previstos, com números competitivos. Não é possível, entretanto, afirmar que o *software* esteja preparado para atender diversos casos, principalmente as grandes obras, primeiro por se tratar de uma versão educacional, segundo pelas diversas limitações que prejudicariam a entrada de informações tais como elas são. Trabalhos, estudos e criações na área podem ser grandes expoentes na transformação deste cenário. O número de trabalhos científicos que incluem AGs, e mais especificamente aplicados à construção civil, é relativamente baixo no Brasil. Por isso é necessário difundir a ideia dos AGs para que mais estudos sejam concebidos, de maneira que a otimização e a qualidade deixem de ser vistas como mutuamente exclusivas e passem a ser consideradas como fortes aliadas para a transformação da construção civil no Brasil e no mundo.

A fim de construir estudos futuros sobre esta linha de pesquisa, sugere-se que utilizem outro *software* de AGs para otimizar a obra rodoviária segundo os dados estabelecidos neste estudo ou em outros estudos; Incluam novas variáveis, como incentivos de adiantamento do final da obra, juros por atrasos, limitação de equipes, e/ou aplicar prazos mais estreitos, a fim de testar o limite que o *software* pode atingir, no caso de não ser possível chegar ao prazo estabelecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrama, F. A. (2012) *Multi-objective genetic optimization of linear construction projects*. HBRC Journal (2012) 8, 144–151
- Alencar, L. B. S. de. *Avaliação do Impacto do Uso da Técnica de Linha de Balanço no Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos em Obras de Rodovia*. 2018. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Projeto Básico de Engenharia para Adequação e Duplicação de Rodovia na Travessia Urbana de Nova Rosalândia – TO*. 2010. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/anexo/Projetos/Projetos_edital0597_10-23_0.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.
- Campos Neto, C. A. da S. et al. *Gargalos e demandas da infraestrutura rodoviária e os investimentos do PAC: mapeamento IPEA de obras rodoviárias*. Brasília: Ipea, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1637/1/TD_1592.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2018.
- Confederação Nacional do Transporte (2017) *Pesquisa CNT de Rodovias 2017*. Brasília: CNT, 2017. Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio Geral/Pesquisa CNT \(2017\) - BAIXA.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2017)%20-%20BAIXA.pdf)>. Acesso em: 05 abr. 2018.
- El-Rayes, K.; Kandil, Amr. (2005) *Time-Cost-Quality Trade-Off Analysis for Highway Construction*. Journal Of Construction Engineering And Management, S.l., v. 131, n. 4, p.477-486.

- Falcão, V. A.; Nobre Júnior, E. F.; Prata, B. de A. (2016a). Optimization Techniques Applied to Earthmoving and Highway Construction: a Survey. *International Review of Civil Engineering (I.R.E.C.E.)*, Vol. 7, N. 5. ISSN 2036 - 9913 September 2016. DOI: 10.15866/irece.v7i5.10294
- Falcão, V. A.; Prata, B. De A. E Nobre Júnior, E. F. (2016b). Modelo de roteirização para a distribuição de materiais de terraplenagem baseado em programação inteira. *Journal of Transport Literature*, 10(3), 20-24, Jul.
- Farazmand, N; Beheshtinia, M. A. (2018) *Multi-objective optimization of time-cost-quality-carbon dioxide emission-plan robustness in construction projects*. *Journal of Industrial and Systems Engineering*. Vol. 11, No. 3, pp. 102-125.
- Gestal, M. et al. (2018) *Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética*. Madrid: Universidade de Coruña, 2010. Disponível em: <<http://centauronorte.cs.buap.mx/IA/LIBROS/algoritmos-geneticos-libro-bueno.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2018.
- Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston: Addison-wesley.
- Hegazy, T. (2005) *Computerized System for Efficient Scheduling of Highway Construction*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [s.l.], v. 1907, p.8-14. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/1907-02>.
- Hegazy, T.; WASSEF, Nagib. (2001) *Cost Optimization in Projects with Repetitive Nonserial Activities*. *Journal Of Construction Engineering And Management*, [s. L.], v. 127, n. 3, p.183-191.
- Hyari, K. and El-Rayes, K. (2004) *A Multi-objective Model for Optimizing Construction Planning of Repetitive Infrastructure Projects*. Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering.
- Hyari, K. and El-Rayes, K. (2006). Optimal Planning and Scheduling for Repetitive Construction Projects. *J. Manage. Eng.* 2006.22:11-19.
- Linden, R. (2012) **Algoritmos Genéticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna.
- Long, L.D. e Ohsato, A. (2009). *A genetic algorithm-based method for scheduling repetitive construction projects, Automation in Construction*. P.499–511.
- Morais, B. de A.; Falcão, V. A. (2017) *Otimização de Equipamentos em Obras de Terraplanagem Utilizando Programação Linear Inteira*. In: Congresso Nacional de Pesquisa Em Transporte da ANPET, 31., 2017, Recife. **Anais..** Recife: Anpet, 2017. p. 2174 - 2184.
- Moselhi, O. e Alshibani, A. (2009). *Optimization of Earthmoving Operations in Heavy Civil Engineering Projects*. *J. Constr. Eng. Manage.*v.135, p.948-954.
- OPTEAM (2018). *EasyPlan*. Disponível em: <http://www.civil.uwaterloo.ca/tarek/OPTEAM/easyplan_prod.html>. Acesso em: 06 abr. 2018.
- Ribeiro Neto, N. J. (2017) *Planejamento de Obras Viárias Aplicando Algoritmos Genéticos*. 2017. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba.
- Salimi, S.; Mawlana, M; Hammad, A. *Performance analysis of simulation-based optimization of construction projects using High Performance Computing*. *Automation in Construction* 87 (2018) 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.003>
- Valencia, P. E. (1997) *Optimización Mediante Algoritmos Genéticos*, *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, p. 83-92.

Luís Fellipe Alves Silva (alvesluisfellipe@gmail.com)
Viviane Adriano Falcão (viviane.afalcao@ufpe.br)