

PLANEJAMENTO DE OBRAS VIÁRIAS APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO

Neuton José Ribeiro Neto
Viviane Adriano Falcão

Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

Sabe-se que o planejamento de obras é imprescindível para a engenharia civil. Várias ferramentas são utilizadas para auxiliar no processo de construção. Uma ferramenta que vem mostrando grande potencial para aumentar a eficiência da obra são os softwares baseado em Algoritmos Genéticos (AG). O objetivo desse artigo é aplicar o software EasyPlan na obra da rodovia PE-096 na tentativa de reduzir os custos e a duração da obra, obtendo uma solução realista para uma gestão mais eficaz dos recursos da obra. Para isso, foi escolhido um estudo de caso da literatura para a validação do *software*. Em seguida, o *software* Easyplan para otimizar o cronograma e custo da obra da PE-096. Após a otimização com o *software* EasyPlan, foi observado uma redução no custo final da obra de 14% e a duração se manteve a mesma. O resultado obtido mostra que o algoritmo genético é uma ferramenta eficiente de planejamento.

ABSTRACT

It is known that the planning of construction projects has a great importance for civil engineering. Several tools are used to help the construction process. One of the tools that The objective of the article is to apply the EasyPlan software to the PE-096 highway project in an attempt to reduce the costs and the duration of the work, obtaining a realistic solution for a more efficient management of the work resources. For this, a case study of the literature for software validation was chosen. After that, the software EasyPlan was used to optimize the schedule and costs of the construction of PE-096. After an optimization with the EasyPlan software, a reduction of 14% in the total cost was observed and the duration of remained the same. The obtained result shows the genetic algorithm is an efficient planning tool.

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do engenheiro é otimizar os custos de uma obra, sem que prejudique a produtividade e a duração da mesma. Durante o processo de construção muitas decisões devem ser tomadas de maneira rápida e efetiva. Contudo essas decisões podem afetar diretamente o resultado final da obra. Para El-Rayes (2005), as principais variáveis a serem avaliadas na tomada de decisão e no desenvolvimento de projetos são: o tempo, a qualidade e os custos.

Algumas das decisões que interferem na relação tempo e custo de obra são a quantidade de equipes de trabalho, a quantidade de equipamentos disponíveis e a determinação de quais materiais e recursos devem ser utilizados na execução. Por exemplo, se na obra é utilizado equipamento de alta tecnologia o custo será alto, quando comparado com equipamentos mais simples, que apresentam menor eficiência, porém a duração da obra será menor. Outro exemplo é o dimensionamento da equipe de trabalho, que influencia diretamente no orçamento e na duração da construção. Caso haja a necessidade de uma equipe maior para que a duração da obra seja menor, o custo com mão-de-obra será maior. Essas decisões afetam diretamente o custo e a duração da obra e são definidas de acordo com as necessidades do projeto.

As obras rodoviárias envolvem um grande número de variáveis que podem interferir no custo e na duração da construção. Hyari (2004) classifica esse tipo de situação como um problema

multiobjetivo, ou seja, há a necessidade de avaliar vários fatores para que o resultado obtido na otimização do custo e na duração seja satisfatório.

Na tentativa de estabelecer uma relação que obtenha o menor custo possível e que a obra seja executada em um tempo limite, alguns trabalhos e estudos acadêmicos aplicam programação matemática, mais especificamente métodos heurísticos. De acordo com Feng (1997) o método heurístico, por ser baseado em observações práticas e históricas, apresenta boas soluções, porém como falta embasamento matemático, pode não garantir a obtenção de uma solução ótima. A programação linear consegue alcançar um valor ótimo, contudo, não consegue abranger o grande número de variáveis que interferem no problema, o que faz com que a situação processada pelo programa não seja totalmente fiel com a realidade.

Para Pimenta e Oliveira (2004), em obras rodoviárias grande parte dos custos são advindos da escavação, transporte e compactação envolvidos no processo de terraplanagem. O custo e a duração da obra é o que a torna atraente para que ela seja colocada em prática, ou seja, quanto menor o custo e duração, mais viável é para que o projeto seja executado.

Para Hegazy (2002) as variáveis tempo, qualidade e custo podem ser organizadas em forma de um triângulo, como mostrado na Figura 1. O modo como as variáveis são dispostas indica que são inversamente proporcionais. Por exemplo, para realizar uma obra de grande qualidade e de baixo custo é necessário um tempo maior, já para realizar uma obra em pouco tempo e de grande qualidade, o custo com a obra será maior. Isso mostra que não há uma resposta única para todos os projetos, mas há uma solução ótima que se encaixe dentro das necessidades de cada obra.

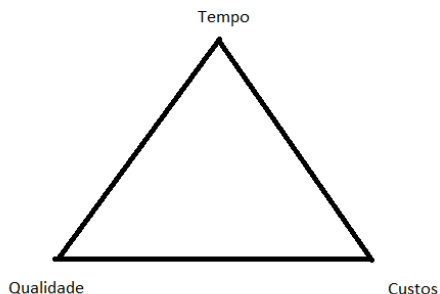


Figura 1: Relação Tempo X Qualidade X Custos. Hegazy (2002)

De acordo com Hyari (2004), a utilização de programação não convencional para os problemas multiobjetivos, como o uso de algoritmo genético, tem se mostrado muito eficiente. Como é comprovado nos trabalhos de Feng (1997), Khaled (2006), entre outros, que constataram um melhoramento na utilização dos recursos disponíveis com a aplicação do algoritmo genético. Esse método de programação tem se mostrado uma ferramenta valiosa na otimização de processo. Deixando claro o grande potencial do algoritmo genético como uma ferramenta de otimização em obras viárias.

O objetivo do trabalho é aplicar algoritmo genético para planejar e avaliar as etapas construtivas de uma obra rodoviária a fim de otimizar todos os fatores que influenciam na produtividade, de modo a obter uma relação ótima entre o cronograma e custos da construção.

Esse trabalho é formado por 5 etapas essenciais para o alcance do objetivo almejado. A Etapa 1 do projeto, consiste em estabelecer um referencial teórico nas áreas de obras viárias (pavimentação e terraplanagem), planejamento de obras e algoritmo genético aplicado em obras viárias. Na Etapa 2 foi escolhido um estudo de caso da literatura para validar a eficiência do *software* Easyplan. A Etapa 3 é a aplicação do algoritmo genético no projeto de uma rodovia real. A Etapa 4 se trata da análise da solução obtida pelo *software* após a aplicação do algoritmo para a otimização. Na Etapa 5 será feita a conclusão quanto a eficiência do algoritmo genético no planejamento de obras viárias.

Para a realização da pesquisa será necessário: um laptop VAIO T Series Ultra book, com processador Intel® Core™ i7-3537U CPU @2.00GHz e memória RAM de 8GB operando em um sistema de 64 bit; os *softwares* Excel e Easyplan.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) foi apresentado por Holland em 1975 no livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Goldberg (1988) define algoritmo genético como um método de busca probabilística desenvolvidos para solucionar problemas de grande escala, sendo que cada variável que interfere no resultado pode ser representada como uma corda. Seu método é baseado na evolução biológica dos seres vivos, pois assim como os seres vivos buscam se adaptar a condições impostas pela natureza, o método utilizado pelo algoritmo genético busca uma solução que se adeque da melhor forma possível a situação apresentada.

Mitchel (1999) explica o funcionamento do algoritmo genético passo-a-passo. Primeiramente o algoritmo organiza suas variáveis em forma de uma corda (análoga ao cromossomo), formando assim uma solução para o problema. Após criar uma quantidade finita de cordas, o sistema analisa as que apresentam melhor desempenho, deixando de lado as que se mostram menos eficiente (análogo à Lei de Darwin). Logo depois, as cordas trocam informações entre si, para que seja criado uma nova solução com um desempenho melhor do que as anteriores (análogo a mutação). Esse processo é repetido até que as cordas apresentem desempenho semelhante ou que por elas alcancem uma determinada restrição do projeto.

Para a formulação do algoritmo genético é necessário realizar uma parametrização para especificar como o *software* deve operar, para garantir que a otimização seja feita nas variáveis desejadas. Senouci (2008) define etapas para a modelação do problema em duas etapas principais, que consistem em: determinar as principais variáveis que interferem no processo construtivo e formular os principais objetivos do modelo. Em obras rodoviárias, exemplos de variáveis que restringem a otimização são a disponibilidade de recursos e equipamentos, a disponibilidade de mão de obra e o tempo máximo de duração da obra. Em geral, a redução de custo e duração do processo de construção são tidos como objetivos principais do modelo.

2.1.1 Algoritmo Genético Aplicado em Planejamento de Obras

O Algoritmo genético é uma ferramenta que, no planejamento de obra, tem a função de organizar e otimizar o processo construtivo. Hyari e El-Rayes (2006) utilizaram o algoritmo genético para o planejamento de obras rodoviárias, analisando a melhor forma de organizar o intervalo entre as etapas construtivas e estabelecer uma proposta ótima entre a duração e o custo.

Senouci (2008) propôs o uso do Algoritmo genético no planejamento de obras de forma que o método crie um módulo para cálculo da duração do projeto, um módulo para computar o custo para a execução do projeto e um último módulo que correlacione os outros dois módulos anteriores de forma a obter uma solução próxima da ótima. Outro exemplo de uso de algoritmo genético para o planejamento é apresentado por El-Rayes (2006), que mostrou o uso do *software* para a otimização do intervalo em obras de construção repetitiva, no caso, a parte estrutural de um edifício, planejando de forma ótima o processo de construção de pilares, vigas e lajes.

Hegazy (2001) utilizou o Easyplan, um programa computacional, criado pelo próprio autor na Universidade de Waterloo, que utiliza o algoritmo genético para otimizar o processo construtivo de uma obra repetitiva não seriada, de forma que obteve resultados positivos quanto ao método construtivo empregado, à organização dos grupos de trabalho e da interrupção nas etapas de construção.

Kandil (2006) desenvolveu uma ferramenta que auxilia no planejamento de obras chamado MACRO (*Multiobjective Automated Constructon Resource Optimization System*). Esse sistema tem como objetivo otimizar o custo, a duração e a qualidade da obra, oferecendo um suporte para a tomada de decisão na escolha do método construtivo e na utilização de recursos. O MACRO utiliza o algoritmo genético como meio de otimizar o processo construtivo. Na pesquisa feita por Kandil (2006) o *software* foi testado em um projeto exemplo que continha uma lista de 180 atividades. Após o processamento de dados utilizando o algoritmo genético obteve-se uma solução para o problema próxima da resposta ótima, de forma a atender as restrições do projeto.

Hegazy (1999) realizou uma pesquisa onde comparou o método utilizado na otimização do custo obtidos através de programação convencional e programação dinâmica com o algoritmo genético. Nessa mesma pesquisa, é criado um método para a otimização de alocação de terra e movimentação de terra.

2.1.2 Software *Easyplan*

Hegazy (2006) define o Easyplan como um *software* que tem como principal objetivo a otimização do custo e da duração de projetos. Ele utiliza a planilha de cálculo do Excel para a aplicação do algoritmo genético de forma a alcançar o resultado esperado.

De acordo com OPTEAM (2006) o Easyplan possui um banco de dados organizados, seção para especificações e estimativas do cronograma, sistema de otimização através do algoritmo genético e um sistema de análises do desempenho e do progresso do projeto.

Para que o *software* cumpra seu objetivo é necessário colocar todos os dados referentes ao projeto, como por exemplo, data de início e fim, custos, duração e juros. Depois, as atividades são especificadas com seus custos unitários, duração e recursos que serão utilizados na atividade. Os recursos utilizados englobam o maquinário e o grupo de trabalhadores envolvidos no processo de execução da atividade. Após definir as atividades, é necessário definir a sequência e os detalhes do cronograma. A próxima etapa estabelecida é o número de iterações para que ocorra a otimização da obra.

Depois de processado é necessário que os resultados sejam salvos para que seja possível dar prosseguimento na análise dos dados obtidos. Já, com os resultados prontos é possível ter acesso a área de controle de progresso da obra. Nessa etapa é possível controlar o andamento da obra, realizar comparações entre o progresso real e o progresso planejado e analisar gráficos quanto ao custo previsto.

3 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Para a validação do método foi simulado no *software* Easyplan um exemplo proposto por Hegazy (2005).

A rodovia possui 3000 metros e foi dividida em 10 seções de 300 metros. A obra é composta por 17 atividades, como indica a Figura 10.

Activity	Description	First Estimate			Second Estimate			Third Estimate		
		Cost1	Dur1	L2	Cost2	Dur2	L2	Cost3	Dur3	L2
1	Escavação, leste	\$21,000	3.0	2.0	\$30,000	2.0	2.0	\$30,000	2.0	2.0
2	Sub-base, leste	\$7,800	2.0	2.0	\$7,800	2.0	2.0	\$7,800	2.0	2.0
3	Base, leste	\$72,000	10.0	3.0	\$80,000	8.0	3.0	\$10,000	5.0	3.0
4	Binder, leste	\$30,000	1.2	1.0	\$30,000	1.2	1.0	\$30,000	1.2	1.0
5	Asfalto, leste	\$14,400	1.0	1.0	\$14,400	1.0	1.0	\$14,400	1.0	1.0
6	Canteiro, leste	\$32,100	2.0	1.0	\$38,000	1.0	1.0	\$38,000	1.0	1.0
7	Iluminação, leste	\$19,245	2.0	2.0	\$25,000	1.0	2.0	\$25,000	1.0	2.0
8	Calçada, leste	\$10,950	2.0	2.0	\$10,950	2.0	2.0	\$10,950	2.0	2.0
9	Pintura	\$198	0.2	1.0	\$198	0.2	1.0	\$198	0.2	1.0
10	Escavação, oeste	\$21,000	3.0	2.0	\$30,000	2.0	2.0	\$30,000	2.0	2.0
11	Sub-base, oeste	\$7,800	2.0	2.0	\$7,800	2.0	2.0	\$7,800	2.0	2.0
12	Base, oeste	\$72,000	10.0	3.0	\$80,000	8.0	3.0	\$80,000	8.0	3.0
13	Binder, oeste	\$30,000	1.2	1.0	\$30,000	1.2	1.0	\$30,000	1.2	1.0
14	Asfalto, oeste	\$14,400	1.0	1.0	\$14,400	1.0	1.0	\$14,400	1.0	1.0
15	Canteiro, oeste	\$32,100	2.0	1.0	\$38,000	1.0	1.0	\$38,000	1.0	1.0
16	Iluminação, oeste	\$19,245	2.0	2.0	\$25,000	1.0	2.0	\$25,000	1.0	2.0
17	Calçada, oeste	\$10,950	2.0	2.0	\$10,950	2.0	2.0	\$10,950	2.0	2.0

Figura 10: Especificação das Atividades.

O cronograma das atividades inicialmente é ilustrado na Figura 11. O cronograma foi definido de acordo com as restrições do projeto, assim criando uma ordem que deve ser seguida para que as atividades possam ser realizadas de forma adequada.

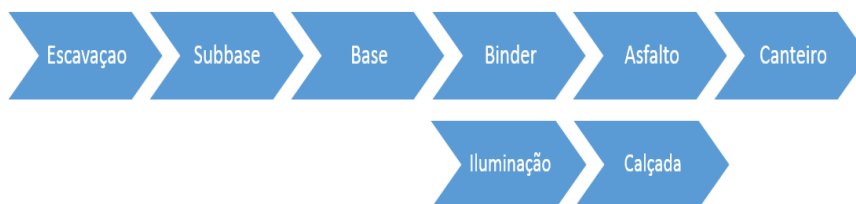


Figura 11: Cronograma inicial da Obra disposto no Easyplan.

A escavação é seguida da construção da sub-base, possibilitando assim, a execução da base, em seguida o binder, asfalto e depois o canteiro. A instalação da iluminação e das calçadas são precedidas pela finalização da base. Hegazy (2005) dividiu a obra em etapa leste e etapa oeste. As atividades de 1 a 8 correspondem a todo processo construtivo da etapa leste, enquanto as

atividades 10 a 17 são as mesmas atividades de 1 a 8, porém referentes a etapa oeste. O projeto define que a pintura deve ser feita após a finalização do canteiro tanto da etapa leste como da etapa oeste, além disso deve ser realizada em 1 dia.

Os dados considerados por Hegazy (2005) são definidos na Figura 12, que se trata da planilha de inserção dos dados gerais da obra. Pelo método adotado por Hegazy (2005) o custo total de uma seção é de \$417.598,00 e a duração é de 27 dias. A obra deve ter uma duração máxima de 30 dias, sendo passível de multa caso haja atraso para entrega da mesma e uma bonificação caso haja adiantamento da entrega.

Three Key Resources			Start Date:	5-Jan-14
Code:	Limit:	Used:	Deadline (Days):	30.0
L2	3.0	3.0	Penalty (\$/d):	100,000
			Incentive (\$/d):	20,000
			Indirect (\$/d):	3,000
Workdays: SA <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> FR			Report Every (d):	4
No. of Activities: 17			i / Period (%):	1.00
Project End Date: 10-Feb-14			Markup (%):	10.00
Project Cost = \$417,598			Hold Back (%):	5.0
Duration (days) = 27.0			Down Payment (%):	
			Suppliers credit (%):	

Resource limits are not exceeded.
Project meets deadline.

Figura 12: Dados Gerais da obra

Analisando a Figura 12, percebe-se que apesar da duração não estar ultrapassando a data limite, para que essa condição seja possível foi utilizado mais recursos do que os disponíveis na prática. Para corrigir e otimizar o projeto da obra o *software* realizou 100 iterações aplicando o Algoritmo Genético. Após a otimização os dados gerais da obra foram alterados como ilustrados na Figura 13.

Three Key Resources			Start Date:	5-Jan-14
Code:	Limit:	Used:	Deadline (Days):	30.0
L2	6.0	9.0	Penalty (\$/d):	100,000
			Incentive (\$/d):	20,000
			Indirect (\$/d):	3,000
Workdays: SA <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> FR			Report Every (d):	4
No. of Activities: 17			i / Period (%):	1.00
Project End Date: 4-Feb-14			Markup (%):	10.00
Project Cost = \$392,498			Hold Back (%):	5.0
Duration (days) = 23.0			Down Payment (%):	
			Suppliers credit (%):	

Warning: Resources exceed limits!..You need to optimize the schedule.
Project meets deadline.

Figura 13: Dados otimizados da Obra

Como observado na Figura 13, ocorreu a otimização do custo e da duração da obra. Comparando com os resultados obtidos por Hegazy (2005), que utilizou um método também baseado no AG nota-se que o EasyPlan foi efetivo. Hegazy (2005) obteve um custo inicial de \$417.598,00 e uma duração de 27 dias, enquanto após a otimização EasyPlan obteve um custo de \$392.498,00 e uma duração de 23 dias. O cronograma proposto pelo EasyPlan, que enquadra

a obra em todas as restrições e apresenta uma solução dada como ótima é ilustrada na Figura 14.

ATIVIDADE	PROCENTAGEM POR DIA	INICIO/FIM (MÊS)
Escavação, leste	33%	1 a 3
Sub-base, leste	50%	4 a 5
Base, leste	13%	8 a 16
Binder, leste	50%	17 a 18
Asfalto, leste	1%	19
Canteiro, leste	1%	20
Iluminação, leste	17%	16 a 21
Calçada, leste	50%	22 a 23
Pintura	100%	21
Escavação, oeste	50%	1 a 2
Sub-base, oeste	50%	3 a 4
Base, oeste	13%	5 a 12
Binder, oeste	50%	14 a 15
Asfalto, oeste	100%	15
Canteiro, oeste	100%	16
Iluminação, oeste	100%	13
Calçada, oeste	50%	14 a 15

Figura 14: Cronograma Otimizado da Obra

4 ESTUDO DE CASO

Para a aplicação do AG, foi escolhida a obra da rodovia PE-099. O trecho a ser otimizado tem 32,2 quilômetros de extensão e é localizada no estado de Pernambuco.

A empresa responsável pela obra dividiu a execução em 9 atividades, sendo elas: terraplanagem, pavimentação, obras de arte especiais, obras de arte correntes, drenagem, sinalização, reabilitação ambiental e obras complementares.

Uma das limitações do EasyPlan é considerar que uma atividade só pode ser iniciada após o término por completo da atividade predecessora. Na prática isso nem sempre acontece, muitas vezes é realizado apenas uma porcentagem da atividade predecessora e já se dá início a próxima atividade. Por exemplo, antes de ser feito todo trabalho de terraplanagem, a execução da pavimentação já começa a ser feita nos trechos onde a terraplanagem está pronta.

Para aumentar a gama de opções que o *software* teria para analisar, e ainda assim criar soluções mais realistas, cada atividade foi subdividida em atividades do mesmo gênero com duração menor, ou seja, atividades que durariam 4 meses, foram divididas em 4 atividades com duração de 1 mês. O cronograma que otimizado foi dividido em 17 atividades, sendo que a atividade de terraplanagem com duração de 4 meses foi dividida em terraplanagem 1, 2, 3 e 4; a pavimentação com duração de 4 meses foi dividida em pavimentação 1, 2, 3 e 4; obras de arte especiais com duração de 1 mês; obras de arte correntes com duração de 1 mês; a atividade drenagem com duração de dois meses foi dividida em drenagem 1 e 2; a sinalização com duração de 3 meses foi dividida em sinalização 1, 2 e 3; reabilitação ambiental e obras

complementares, ambas com duração de 1 mês. Os custos de cada atividade, a duração e o recurso utilizado em cada atividade está ilustrado na Figura 15.

Considerando a localização, as condições meteorológicas e climáticas da obra, foi adotado que o rendimento dos grupos de trabalhos é igual durante todas as estações do ano. O parâmetro utilizado como o rendimento das equipes foi no valor de 1, assim considerando que todos têm o mesmo rendimento e que trabalham dentro programado pelo projeto.

Activity	Description	Cost1	Dur1	L2
1	Terraplanagem - 1	\$573,497	1.0	3.0
2	Terraplanagem - 2	\$573,497	1.0	3.0
3	Terraplanagem - 3	\$573,497	1.0	3.0
4	Terraplanagem - 4	\$573,497	1.0	3.0
5	Pavimentação - 1	\$3,765,779	1.0	3.0
6	Pavimentação - 2	\$3,765,779	1.0	3.0
7	Pavimentação - 3	\$3,765,779	1.0	3.0
8	Pavimentação - 4	\$3,765,779	1.0	3.0
9	Obras de Arte Especiais	\$684,893	4.0	3.0
10	Obras de Arte Corrente	\$2,607,831	4.0	3.0
11	Drenagem - 1	\$1,563,705	1.0	2.0
12	Drenagem - 2	\$1,563,705	1.0	2.0
13	Sinalização -1	\$301,601	1.0	1.0
14	Sinalização -2	\$301,601	1.0	1.0
15	Sinalização -3	\$301,601	1.0	1.0
16	Reabilitação Ambiental	\$454,416	2.0	1.0
17	Obras Complementares	\$935,514	3.0	1.0

Figura 15: Especificação das atividades da PE099

O cronograma físico-financeiro proposto pela empresa prevê que o gasto total da obra seja de R\$25.653.558 uma duração de 12 meses e a utilização de 11 grupos de trabalhos.

O Algoritmo Genético trabalha comparando possíveis soluções para o problema, de forma a selecionar aquela resposta que apresenta o melhor desempenho. O número de comparações entre resultados é de suma importância para garantir que o resultado encontrado realmente seja próximo do resultado ótimo, pois quanto mais iterações, mais soluções são geradas e maior é a probabilidade de gerar uma solução com melhor desempenho. Para garantir a otimização e alcançar os resultados definiu-se que seriam realizados 100 ciclos de comparação entre os resultados, de forma que o resultado final fosse uma opção ótima para o problema.

Seguindo o cronograma inicial, seriam necessárias 11 equipes de trabalho para conseguir realizar a obra na data prevista. A fim otimizar a quantidade de recursos utilizados na obra, foi proposto a utilização de 6 equipes de trabalhos para executar toda a obra na mesma duração proposta inicialmente. Inicialmente foi proposto que a obra teria no máximo 6 recursos, ou seja, 6 grupos de trabalhadores e maquinário atuando simultaneamente e que a duração máxima do projeto seria de 12 meses. Informações como taxa de juros, multa por atraso, incentivo por adiantamento e período de relatório, não foram informados na planilha física-financeira. Dessa forma, optou-se por utilizar dados já adotados por Hegazy (2005) em seu projeto de otimização

de obras. O valor para taxa de juros é de 1%, a multa por atraso é de R\$100.000 por mês, o incentivo para adiantamento é de R\$20.000 ao mês e o período de relatório é de 4 meses. Os dados iniciais da obra foram dispostos de acordo com a Figura 16.

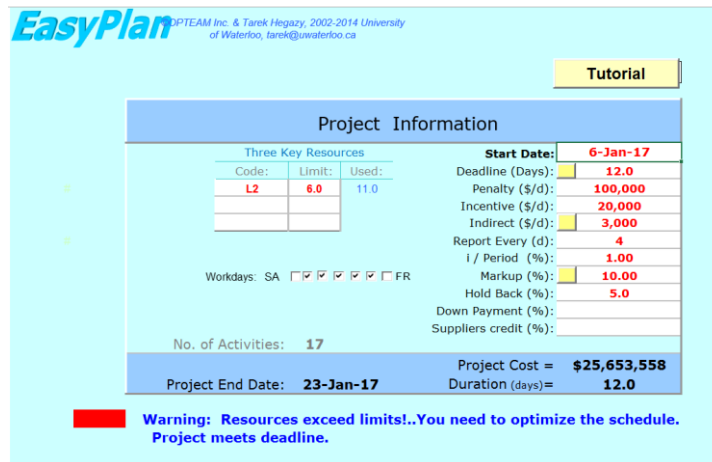


Figura 16: Informações iniciais da obra.

O cronograma gerado pelo EasyPlan, referente a esse custo e duração inicialmente proposto, é mostrado na Figura 17. Especificando a porcentagem da atividade que deve ser concluída, a sequência de trabalho, e os dias em que cada atividade deve ser realizada.

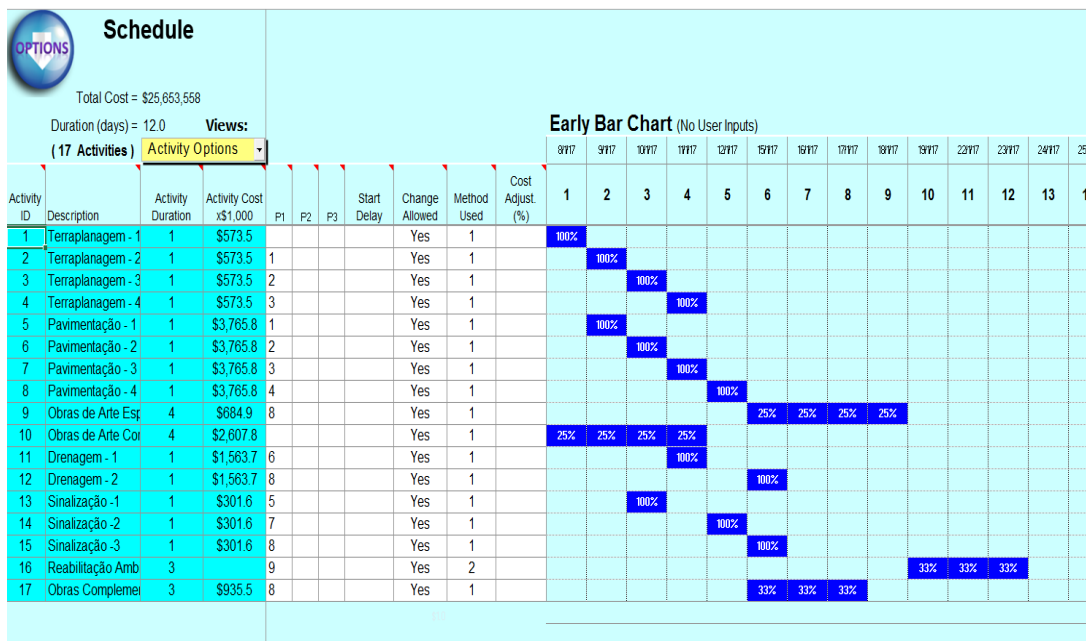


Figura 17: Cronograma Inicial da obra

O processo de terraplenagem será realizado em sequência, tendo início no mês 1 e sendo finalizado no mês 4. A pavimentação tem início no mês 2 e fim no mês 5, também sendo realizada em sequência. As obras de Arte Especiais são realizadas do mês 6 ao mês 9, as obras de arte corrente do mês 1 ao mês 4. A drenagem 1 é completada no mês 4 e a drenagem 2 no mês 6. A sinalização 1, 2 e 3 são feitas respectivamente nos meses 1, 3 e 4. A reabilitação

ambiental tem início no mês 10 e fim no mês 12 e as obras complementares são executadas nos meses 6,7 e 8.

Após o *software* aplicar o algoritmo genético nos dados iniciais do projeto, foi proposto um novo cronograma, obtendo assim, novas informações exibidas na Figura 18.

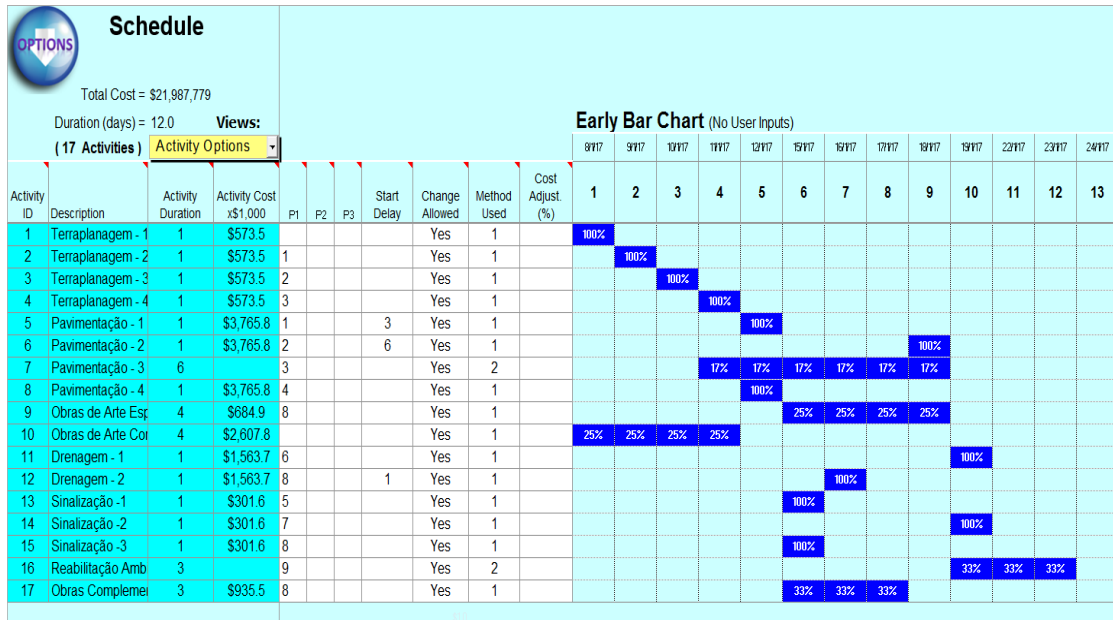


Figura 18: Cronograma da obra otimizado.

No cronograma já otimizado, é observado uma mudança quanto o sequenciamento das atividades propostas, sendo que as restrições do projeto continuam a ser atendidas. Essa mudança visa o melhor aproveitamento dos grupos de trabalhos e dos recursos utilizados em casa atividade. Essa nova sequência de execução propõe um menor uso de recursos simultâneos, de forma que os gastos com grupos de trabalhos sejam menores, havendo um maior aproveitamento dos recursos já disponíveis.

A terraplanagem é executada em sequência do mês 1 até 4. A pavimentação 1 é feita no mês 5, a pavimentação 2 no mês 9, a pavimentação 3 é feita do mês 4 ao mês 9 e a pavimentação 4 é feita no mês 5. As obras de arte especiais têm início no mês 6 e fim no mês 9. As obras de arte correntes são executadas do mês 1 ao mês 4. A drenagem 1 é executada no mês 10 e a drenagem 2 no mês 6. A sinalização 1 e 3 são realizadas no mês 5 e a sinalização 2 no mês 3. A revitalização ambiental é feita dos meses 10 ao 12 e as obras complementares dos meses 5 ao 8.

As informações gerais do projeto após a otimização são ilustradas na Figura 19.

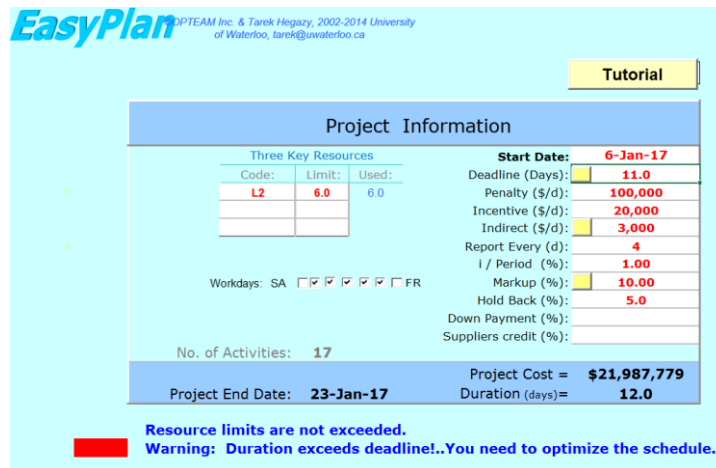


Figura 19: Dados finais da obra

Observa-se que a duração se manteve a mesma, porém houve uma redução no custo de R\$3.665.779,00, o que corresponde a uma redução de um pouco mais de 14% de economia. Em relação ao tempo não foi possível diminuir a duração sem que os recursos fossem excedidos. Como pode-se observar na Figura 19, quando selecionado que o período de obra seria 11 meses, não foi possível alcançar esse objetivo sem que alterasse os recursos disponíveis, consequentemente o investimento financeiro.

Essa economia de capital acontece devido a reorganização das atividades, possibilitando uma utilização dos recursos disponíveis mais eficiente, alcançando o mesmo objetivo com um menor investimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

É possível notar que o Algoritmo Genético é uma ferramenta eficaz para otimização de processos repetidos de construção. Seu funcionamento permite que o *software* se adapte as restrições de projeto e alcance um resultado próximo do ótimo. Apesar de ser considerado programação não convencional, existem pesquisas que aplicam o algoritmo genético para otimizar o processo construtivo em várias vertentes, como por exemplo, otimizar o intervalo de trabalho de equipes. Os resultados alcançados se mostram positivos, diminuindo o custo da obra. Durante no estudo a qualidade da obra é mantida padrão, ou seja, mesmo com a alteração do custo e da duração da obra, a qualidade dos serviços e do resultado obtido não é alterado com a otimização.

No problema usado para a validação fica claro a eficiência do *software* quanto a otimização do custo e do tempo. Diminuindo a duração da obra em 4 dias e o custo em R\$25.100,00, o que corresponde a 6% do custo total, assim alcançando o objetivo esperado. O *software* propôs a utilização de um número maior de grupos de trabalho e na diminuição do tempo de obra. Devido ao incentivo que é dado para caso haja a antecipação do cronograma, essa é uma opção viável, já que o custo final seria menor do que o custo proposto inicialmente.

Na obra da rodovia PE-099, o algoritmo genético mais uma vez se mostrou eficiente. O EasyPlan reduziu o custo total da obra em 14%, diminuiu a quantidade de recursos utilizados e manteve a duração do projeto. Através da realocação de grupos de trabalho e um cronograma mais eficiente foi possível obter uma solução próxima a ótima para o projeto. Apesar da duração

da obra se manter a mesma, a redução do custo foi devido a melhor utilização dos grupos de trabalho, ou seja, o cronograma foi definido de forma que as atividades são realizadas simultaneamente com a necessidade de menos grupos de trabalho.

Apesar do *software* apresentar limitações quanto ao número de restrições para cada atividade e todas as atividades serem limitadas de início-fim, ou seja, todas as atividades quando iniciadas são obrigatoriamente finalizadas por completo, o resultado obtido pelo EasyPlan é uma opção ótima para o problema levando em conta as restrições do projeto, como por exemplo, disponibilidade de recursos, tempo de duração máximo da obra e investimento financeiro máximo, ou seja, busca encontrar uma solução que se enquadre nas realidades da obra.

A Figura 20 mostra uma comparação entre o cronograma antes e depois da otimização do estudo de caso da rodovia PE-099. Na comparação entre os cronogramas é possível perceber que adotando um planejamento adequado é possível alcançar o objetivo desejado sem que sejam feitos gastos desnecessários.

ATIVIDADE	Antes da Otimização		Após Otimização	
	PORCENTAGEM POR MÊS	INICIO/FIM (MÊS)	PORCENTAGEM POR MÊS	INICIO/FIM (MÊS)
Terraplanagem - 1	100%	1	100%	1
Terraplanagem - 2	100%	2	100%	2
Terraplanagem - 3	100%	3	100%	3
Terraplanagem - 4	100%	4	100%	4
Pavimentação - 1	100%	2	100%	5
Pavimentação - 2	100%	3	100%	9
Pavimentação - 3	100%	4	17%	4 a 9
Pavimentação - 4	100%	5	100%	5
Obras de Arte Especiais	25%	6 a 9	25%	6 a 9
Obras de Arte Corrente	25%	1 a 4	25%	1 a 4
Drenagem - 1	100%	4	100%	10
Drenagem - 2	100%	6	100%	7
Sinalização - 1	100%	3	100%	6
Sinalização - 2	100%	5	100%	10
Sinalização - 3	100%	6	100%	6
Reabilitação Ambiental	33%	10 a 12	33%	10 a 12
Obras Complementares	33%	6 a 8	33%	6 a 8

Figura 20: Comparação entre o cronograma inicial e final do projeto

Nota-se que a resposta obtida apresentou um melhor desempenho que a solução inicialmente proposta. O cronograma proposto na Figura 20 se mostra mais eficiente pois ele organiza as atividades de forma a diminuir a variação na quantidade de recursos e mão de obra utilizados, fazendo assim que haja um maior aproveitamento dos funcionários e dos recursos. Ou seja, a quantidade de trabalhadores executando a obra simultaneamente será mais constante do que no cronograma inicial, fazendo assim, que seja necessário um menor número de recursos e trabalhadores o que diminui o custo total da obra. Uma situação que é evitada é o caso do mês 4 e 5 do cronograma antes da otimização, onde grandes atividades acontecem simultaneamente,

fazendo assim com que seja necessário um maior número de recursos. No cronograma otimizado, esse tipo de situação é evitado, sendo preferível igualar a quantidade de recursos utilizados durante toda a duração da obra.

O uso de *softwares* no planejamento em obras rodoviárias, é uma ferramenta que pode diminuir o custo e otimizar o processo construtivo de rodovias. Quando os resultados obtidos pelo *software* são utilizados como base para a criação do orçamento é possível criar um escopo de projeto bem definido e que prevê gastos que atendem as restrições do projeto.

O EasyPlan, por meio da utilização do AG, alcançou o objetivo esperado, mostrando que o método é eficiente quanto a otimização de obras viárias, vindo a ser uma ferramenta útil para o planejamento e execução de determinadas obras.

6 CONCLUSÃO

Com este artigo, é possível concluir que o planejamento é algo de grande importância para obras viárias, já que conseguem obter uma grande economia financeira e uma redução na duração da obra. Obras viárias, em sua grande maioria, demandam um grande investimento de tempo e de capital, deste modo, um planejamento adequado e eficaz tem grande impacto no resultado final da obra.

Quando aplicado o algoritmo genético através do uso do *software* EasyPlan no exemplo utilizado na validação do método, foi possível uma diminuição no custo da obra em 6% e o duração da obra em 4 dias, já no estudo de caso da rodovia PE-099, o método otimizou o custo em 14% e manteve a duração. A análise do resultado nos dois casos mostra a eficiência do modelo perante ao planejamento de obra, pois foi possível uma otimização na execução da obra, havendo uma melhoria no cronograma físico-financeiro.

Essa otimização é realizada através da locação dos grupos de trabalhos e do sequenciamento das atividades a serem realizadas, de modo que as restrições do projeto sejam respeitadas. Com um cronograma que aproveita melhor os grupos de trabalho e os recursos disponíveis é possível diminuir o investimento em mão de obra, assim diminuindo o custo total da obra.

O planejamento de obras viárias tem como objetivo definir a melhor solução para a utilização dos equipamentos e mão de obra, de modo a diminuir os custos e duração da obra. O Algoritmo Genético se mostrou um meio eficaz de otimizar o cronograma físico-financeiro, podendo assim, ser considerada uma ferramenta de grande auxílio no planejamento de obras viárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EL RAYES, K.; KANDIL, A. (2005) Time-cost-quality Trade-Off Analysis for Highway Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 131, n. 4, p. 477-486.
- GOLDBERG, D. E.; HOLLAND, J. H. (1998) Genetic Algorithms and Machine Learning. *Kluwer Academic Publishers*, v. 3, n. 3, p. 95-99.
- FENG, C. *et al.* (1997) Using Genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems. *Journal of computing in civil engineering*, v. 11, n. 3, p. 184-189
- HEGAZY, T. (1999) Optimization of Resource Allocations and Leveling Using Genetic Algorithms. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 125, n. 3, p. 167-175.
- HEGAZY, T. (2001) Cost Optimization in Projects with Repetitive Nonserial Activities, *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 127, n. 3, p. 183-191.
- HEGAZY, T. (2002) *Computer-based Construction Project Management*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

- HEGAZY, T. (2005) Computerized System for Efficient Scheduling of Highway Construction. *Journal of the Transportation Research Board*, v. 1907, n. 1, p. 8-14.
- HEGAZY, T. (2006) *EasyPlan- Software Simplified Project Management*. University of Waterloo Press, Waterloo, ON, Canadá.
- HYARI, K. and EL-RAYES, K. (2004) A Multi-objective Model for Optimizing Construction Planning of Repetitive Infrastructure Projects. *Anais da International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, ICCCB, Weimar, v.10, p. 56-67.
- KANDIL, A.; EL-RAYES, K. (2006) *Multiobjective Automated Construction Resource Optimization System*. *Journal of Management Engineering*, v. 22, n. 3, p. 126-134.
- KHALED H.;EL-RAYES K. (2006). Optimal Planning and Scheduling for Repetitive Construction Projects. *Journal of Management Engineering*, v. 22, n. 1, p. 11-19.
- MATTOS, A. D. (2010) *Planejamento e controle de obras*. Editora Pini, São Paulo.
- MITCHELL, M. (1999) *An Introduction to Genetic Algorithms* (5ª ed.). A Bradford Book, Cambridge, MS, USA.
- OPTEAM (2006) *EasyPlan Software for Simplified Project Management*. University of Waterloo Press, Waterloo, ON, Canadá.
- PIMENTA, C.R.T. e OLIVEIRA, M.P. (2004) *Projeto Geométrico de Rodovias* (2ª Ed.). RIMA Editora, São Carlos.
- PMI (2013) *Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos. Guia PMBOK* (5ª ed). Project Management Institute, Newtown Square, Pennsylvania, USA.
- PONTES FILHO, G. (1998) *Estradas de Rodagem - Projeto Geométrico*. Editora Bidim, São Carlos.
- SENOUCI, A.; AL-DERHAM, H. R. (2008) Genetic algorithm-based multi-objective model for scheduling of linear construction projects. *Advances in Engineering Softwares*, v. 39, n. 12, p. 1023-1028.
- SHAWKI, K.; KILANI, K.; GOMAA, M. (2015) Analysis of earth-moving systems using discrete-event simulation. *Alexandria Engineering Journal*, v. 54, n. 3, p. 533-540.