



OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PROJETOS MULTI-OBJETIVO UTILIZANDO UM ALGORITMO VNS: APLICAÇÕES EM PROJETOS DE CONSTRUÇÃO

Helton Cristiano Gomes

Francisco de Assis das Neves

helton.gomes@gmail.com.com

neves.assis@gmail.com

Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Universitário s/n, Morro do Cruzeiro, 35400-000, Minas Gerais, Ouro Preto, Brasil.

Resumo. Diversos problemas de engenharia podem ser escritos matematicamente como um problema de otimização, onde diferentes objetivos devem ser analisados. Tais objetivos podem ser considerados individualmente ou em conjunto, diferenciando, dessa forma, os métodos de resolução. Dentre esses problemas, destaca-se o problema de sequenciamento de atividades em projetos (PSAP), que pode ser aplicado em diversas situações, como, por exemplo, na construção civil. A principal meta ao determinar uma sequência otimizada para as atividades é completar o projeto dentro do orçamento e do prazo previstos, satisfazendo a todos os seus participantes. O PSAP pode ser considerado um problema multi-objetivo, visto que os gestores procuram finalizar seus projetos o mais rápido possível, com o mínimo custo e com a máxima qualidade. Nesse trabalho, o PSAP foi abordado com restrições de recursos e de precedência entre as atividades (PSAPRP). O PSAPRP foi formulado como um problema multi-objetivo (MOPSAPRP), considerando dois objetivos: duração e custos (direto e indireto). Para a resolução do MOPSAPRP foi utilizado um método baseado na metaheurística variable neighborhood search (VNS). A resolução de um problema multi-objetivo consiste em analisar diferentes soluções viáveis, considerando uma função constituída por diversos termos/objetivos, e obter um conjunto que determinará uma fronteira de Pareto. A metodologia proposta foi testada utilizando dois cenários de um projeto real de construção disponível na literatura. Com isso, buscou-se analisar a influência da disponibilidade de recursos na duração e nos custos do projeto.

Palavras-chave: Projetos de construção, Sequenciamento de atividades, Otimização multi-objetivo, Metaheurísticas.

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento na competitividade do mercado imobiliário, a melhor utilização dos recursos produtivos, como, por exemplo, a mão de obra e a matéria-prima, tornou-se de extrema importância para a construção civil. Esse fato tornou essencial a utilização de novas tecnologias para reduzir os erros e falhas no processo construtivo, principalmente na etapa de elaboração de projetos. Projetos mal elaborados estão entre os principais responsáveis por erros e falhas que surgem no setor construtivo. Grande parte do retrabalho e dos desperdícios que ocorrem nesse setor são consequências da falta e/ou mau planejamento e orientação no gerenciamento dos projetos.

Dentre as ferramentas capazes de auxiliar a engenharia na tomada de decisões relativas ao gerenciamento de projetos, destaca-se aqui a otimização, ferramenta ainda pouco aplicada em projetos de construção civil. Existem diversos problemas de otimização relacionados a projetos, os quais se enquadram em diversas aplicações reais. Um importante exemplo é o problema de sequenciamento de atividades em projetos (PSAP), onde podem ser consideradas ou não restrições de recursos, de tempo e de precedência entre as atividades. Um sequenciamento otimizado das atividades de um projeto resulta em um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e, conseqüentemente, ganho de tempo e produtividade.

Visto que os responsáveis por projetos buscam finalizá-los o mais rápido possível, com o mínimo custo e com máxima qualidade, o PSAP configura-se um problema de otimização multi-objetivo (OM). Ao trabalhar com problemas de OM é interessante considerar objetivos conflitantes, onde a melhoria de algum(uns) dele(s) pode causar, conseqüentemente, a piora de outro(s). Essa situação ocorre em muitos problemas encontrados no mundo real.

Nesse trabalho, o PSAP foi abordado com restrições de recursos e de precedência entre as atividades (PSAPRP). O PSAPRP foi formulado como um problema multi-objetivo (MOPSA-PRP), considerando dois objetivos: duração e custos (direto e indireto).

A resolução de problemas de OM apresenta vantagens em relação à mono-objetivo pois gera soluções com diferentes contrapartidas entre os distintos objetivos. Contudo, é necessário que o gestor (tomador de decisões) escolha a solução que melhor atenda às necessidades do projeto. Sendo assim, é muito importante a escolha de uma técnica que determine o conjunto de soluções mais adequado.

Devido ao fato de o PSAPRP pertencer à classe de problemas caracterizados pelo crescimento fatorial do tempo computacional requerido para considerar todas as possíveis soluções, de acordo com o aumento do tamanho do problema, os métodos mais adequados para solucioná-lo são os aproximados. Visto isso, foi proposto nesse trabalho um método baseado na metaheurística *variable neighborhood search* (VNS) para sua resolução.

Visando exemplificar a aplicação da metodologia proposta, foi utilizado um projeto real de construção civil encontrado na literatura. Com base nos resultados obtidos pelo método para dois cenários do projeto, é apresentada uma análise acerca da influência da disponibilidade de recursos em relação aos objetivos adotados. Um cenário se difere do outro pela disponibilidade de recursos.

O restante desse trabalho está organizado como segue: na seção 2 são relatadas a importância e as características do problema abordado. Na seção 3 são descritos os principais conceitos da otimização multi-objetivo. Na seção 4 é apresentado o método proposto para a

resolução do problema. Na seção 5 é apresentado o projeto utilizado para testar o algoritmo, bem como são expostos e analisados os resultados obtidos. A seção 6 conclui o trabalho.

2 PLANEJAMENTO DE PROJETOS DE CONSTRUÇÃO

De acordo com Hendrickson (2008), o planejamento é uma fundamental e desafiante tarefa no gerenciamento de um projeto de construção. Ele envolve a escolha da tecnologia a ser utilizada, a definição das atividades do projeto, bem como suas durações e inter-relações, e a estimativa dos recursos necessários. Segundo o autor, com base em um bom planejamento, a definição do orçamento e a determinação da sequência em que as atividades do projeto deverão ser executadas são muito mais precisas, evitando desperdícios de recursos e de tempo. Para os autores, a determinação das atividades e a sequência em que elas serão executadas são as tarefas mais importantes no planejamento de projetos.

A definição correta das atividades pode ser trabalhosa visto que um projeto de construção pode envolver um grande número de atividades. As atividades podem ser definidas como trabalhos elementares cuja execução demanda um certo número de unidades de tempo e recursos, além de apresentarem relações de precedência. A sequência em que essas atividades devem ser executadas afeta diretamente os custos e a duração do projeto, sendo um "elemento crítico" para o seu sucesso. Entretanto, a determinação da melhor sequência não é uma tarefa trivial devido às inúmeras sequências possíveis, sendo, dessa forma, necessária a utilização de algum tipo de ferramenta para a sua determinação.

Uma importante classe de ferramentas que pode auxiliar a engenharia no planejamento e controle de projetos de construção é a otimização. Segundo Geyer (2009), a otimização é uma poderosa ferramenta no suporte ao planejamento de projetos, mas ainda é pouco aplicada no setor de construção. Ainda de acordo com o autor, a aplicação da otimização traz dois benefícios principais: o resultado obtido pode tanto levar a uma solução de melhora como a um conhecimento mais amplo sobre as possíveis soluções.

Dentre os vários problemas de otimização relacionados a projetos, destaca-se aqui o problema de sequenciamento de suas atividades. Segundo Oguz e Bala (1994), o PSAP é importante e desafiador tanto para os profissionais responsáveis pela gestão de projetos como também para os pesquisadores de áreas afins. De acordo com os autores, uma das razões de sua importância é por este ser um problema comum a um grande número de situações reais de tomada de decisão. O PSAP é desafiador, do ponto de vista teórico, por pertencer à classe de problemas de otimização combinatória NP-difíceis (Garey e Johnson, 1979).

Visto que os gestores buscam finalizar seus projetos o mais rápido possível, com o mínimo custo e com máxima qualidade, o PSAP foi abordado nesse trabalho como um problema de OM. Na seção 2.1 é descrito o MOPSAPRP, bem um modelo matemático genérico adaptado para o mesmo.

2.1 Problema de Sequenciamento de Atividades em Projetos

De acordo com Baker (1974), um problema de sequenciamento consiste na alocação de recursos ao longo do tempo para executar um conjunto de atividades. Existem diversos tipos de problemas de sequenciamento que se enquadram em inúmeras aplicações reais, sendo o PSAP (Kelley (1963)) um importante exemplo. O PSAP motivou o estudo de diversos autores como

Balas (1967), Brucker *et al.* (1998), Brucker *et al.* (1999), Brucker e Knust (2000), Carlier e Néron (2003), Liu e Wang (2007), Rogalska *et al.* (2008), Christodoulou (2009), Koné *et al.* (2009) e König e Beibert (2009), dentre outros.

Na literatura podem ser encontradas diversas configurações para o PSAP, porém, no problema abordado nesse trabalho foram consideradas como restrições a disponibilidade de recursos e as relações de precedência entre as atividades, as quais podem ter mais de um modo de execução. Os objetivos adotados foram a minimização da duração e dos custos do projeto. O MOPSAPRP é denotado por $m, 2|cpm|multi$.

De forma geral, o MOPSAPRP pode ser definido da seguinte maneira: um projeto consiste em um conjunto de atividades inter-relacionadas. A execução das atividades possui um custo e uma duração pré-determinada e demanda por recursos, que estão disponíveis em quantidade limitada. Nessas condições, na resolução do MOPSAPRP busca-se determinar a data de início de execução de cada uma das atividades, visando a minimização da duração e dos custos do projeto, assegurando que o nível de recursos e as relações de precedência não sejam violados.

Vários modelos matemáticos podem ser encontrados na literatura, como, por exemplo, os de programação linear inteira descritos por Brucker *et al.* (1999) e Koné *et al.* (2009). Um modelo genérico, adaptado para a OM, é apresentado na seção a seguir.

2.2 Modelo Matemático para o MOPSAPRP

Genericamente, o MOPSAPRP pode ser formulado matematicamente da seguinte forma:

- **Parâmetros**

- A : conjunto de atividades, $A = 1, \dots, n$;
- R : conjunto de recursos, $R = 1, \dots, m$;
- E : conjunto de pares de atividades (i, j) , no qual a atividade i é predecessora da atividade j ;
- H : horizonte de sequenciamento, $H = 1, \dots, T$ onde T é a data máxima (limite superior) proposta para a finalização do projeto;
- p_i : tempo de execução da atividade i ;
- b_{ik} : demanda da atividade i pelo recurso k ;
- B_k : disponibilidade do recurso k ;
- $P(t)$: conjunto de atividades em execução no instante de tempo t , $P(t) = \{i \in A | S_i \leq t < S_i + p_i\}$;

- **Variáveis de Decisão**

- S_i : data de início da execução da atividade i ;

• Modelo Matemático

$$\text{minimizar } f(s) = f(f_1(s), f_2(s)) \quad (1)$$

$$\text{sujeito a: } S_j \geq S_i + p_i \quad \forall (i, j) \in E \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P(t)} b_{ik} \leq B_k \quad \forall k \in R; \forall t \in H \quad (3)$$

$$S_i \geq 0 \quad \forall i \in A \quad (4)$$

A função objetivo (1) é composta por dois termos/objetivos onde $f_1(s)$ indica a minimização da data de finalização e $f_2(s)$ a minimização dos custos do projeto. As restrições do tipo (2) estabelecem as relações de precedência entre as atividades, isto é, se $(i, j) \in E$ então o início da execução da atividade j só pode ocorrer após a finalização da execução da atividade i ($S_i + p_i$). As restrições (3) garantem que a disponibilidade dos recursos não seja violada em cada período de tempo t ($t = 1, \dots, T$). As restrições (4) estabelecem o domínio das variáveis.

2.3 Relação Duração×Custos em um Projeto de Construção

Duração e custos são altamente relacionados em projetos de construção. Geralmente, a duração mais curta de um projeto resulta em maiores custos diretos e em menores custos indiretos. A relação entre duração e custos pode ser vista na Figura 1. Na Figura 1, CT representa o custo total do projeto, CI o custo indireto e CD o custo direto, sendo $CT = CI + CD$.

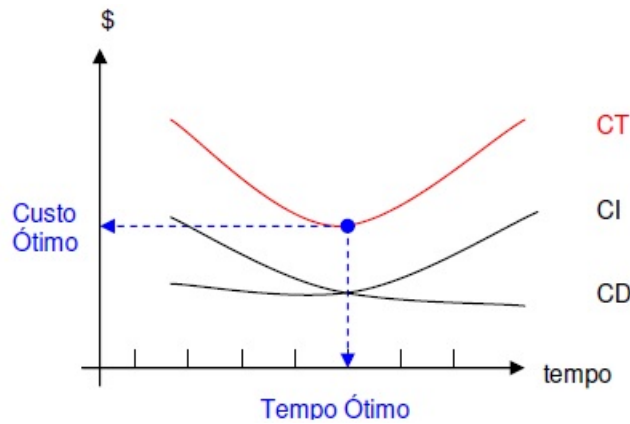


Figura 1: Relação duração×custos em projetos

O CD diz respeito aos dispêndios efetuados diretamente no processo de construção. Por sua vez, o CI é composto pelos dispêndios efetuados com administração, como custos incidentes ou a serem suportados pelo empreendimento, mas não diretamente incidentes sobre o processo de construção. Havendo redução no tempo de execução de qualquer atividade do projeto, o custo inerente a essa aceleração deve ser acrescido ao CD. Essa aceleração pode ser alcançada pelo aumento na disponibilidade dos recursos e seus custos são denominados custos marginais.

Nesse trabalho, o objetivo da análise da relação duração×custo de um projeto é encontrar uma ordem de execução para as atividades, minimizando seus custos e mantendo uma duração desejada. As restrições de recursos afetam diretamente nessa relação. A duração de um projeto

pode ser encurtada disponibilizando mais recursos. No entanto, é importante identificar até que ponto a duração do projeto depende da limitação de recursos. Além disso, essa maior disponibilização de recursos afeta diretamente nos custos do projeto. Segundo Chen e Wheng (2009), a disponibilidade e a alocação de recursos são chaves para a geração de sequenciamentos viáveis em problemas com recursos limitados. Já as relações de precedência afetam a duração do projeto, visto que algumas atividades precisam ser realizadas em uma sequência particular, ou seja, uma atividade não pode ser iniciada enquanto suas precedentes não forem finalizadas.

As abordagens mais utilizadas para a resolução do MOPSAPRP são as metaheurísticas. Isso se deve ao fato de o problema ser de difícil resolução, principalmente para projetos com dimensões elevadas, como nos casos reais. Propõe-se no presente trabalho um método baseado na metaheurística VNS para a resolução do problema. Antes da descrição do método é necessário definir-se o conceito de ótimo de Pareto, conceito de extrema importância para o seu desenvolvimento.

3 CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO

Para o melhor entendimento do método desenvolvido, são descritos a seguir alguns conceitos de otimização multi-objetivo.

Definição 1 - Dominância de Pareto

Considerando l objetivos de minimização, dadas duas soluções viáveis s e s' , tem-se que:

- se $f_k(s) \leq f_k(s') \forall k = 1, 2, \dots, l$ e $f_j(s) < f_j(s')$ para pelo menos algum $j = 1, 2, \dots, l$, s será uma solução que domina s' ;
- se $f_k(s') \leq f_k(s) \forall k = 1, 2, \dots, l$ e $f_j(s') < f_j(s)$ para pelo menos algum $j = 1, 2, \dots, l$, s será uma solução dominada por s' ;
- se $f_j(s) < f_j(s')$ para algum $j = 1, 2, \dots, l$ e $f_i(s) > f_i(s')$ para algum $i = 1, 2, \dots, l$, s e s' são ditas não-dominadas entre si ou indiferentes.

Definição 2 - Pareto-ótimo

Uma solução viável s é chamada eficiente ou Pareto-ótima se não existir nenhuma outra solução viável s' que domine s , ou seja, uma solução s' tal que $f_k(s') \leq f_k(s) \forall k = 1, 2, \dots, l$ e $f_j(s') < f_j(s)$ para pelo menos algum $j = 1, 2, \dots, l$.

O conjunto de todas as soluções Pareto-ótimas é denominado fronteira Pareto-ótima e, em decorrência dos conceitos definidos, todas as soluções pertencentes à fronteira Pareto-ótima são não-dominadas entre si.

No método baseado na metaheurística VNS proposto nesse trabalho foi utilizado o critério de dominância de Pareto para avaliar as soluções geradas ao longo de suas iterações e determinar o conjunto de soluções não-dominadas, denotado por D^* , a ser retornado.

4 METAHEURÍSTICA VNS APLICADA AO MOPSAPRP

A metaheurística VNS (Mladenovic e Hansen (1997)) tem sido aplicada eficientemente na resolução de diversos tipos de problemas de otimização combinatória mono-objetivo, mas poucas aplicações são encontradas na literatura para problemas de OM. A primeira aplicação

do VNS para a resolução de um problema multi-objetivo foi proposta por Geiger (2008). Outras aplicações podem ser encontradas em Liang *et al.* (2009), Liang e Lo (2010), Paiva *et al.* (2010), Ottoni *et al.* (2011) e Gomes *et al.* (2014). Vista sua eficiência e pouca aplicação na OM, decidiu-se pela utilização de um método baseado no VNS para a resolução do MOPSA-PRP. Seu pseudocódigo é apresentado no algoritmo a seguir.

Algoritmo: *Metaheurística VNS para o MORCPSRP*

1 **Entrada:** r , *criterio de parada*

2 **Saída:** D^*

3 Construa 3 soluções (sequenciamentos) $\{s_1, s_2, s_3\}$ utilizando diferentes regras de prioridade;

4 $D^* \leftarrow$ soluções não-dominadas de $\{s_1, s_2, s_3\}$;

5 **Enquanto** (*criterio de parada* = *Falso*) **Faça**

6 Escolha, aleatoriamente, uma solução não visitada $s \in D^*$;

7 $Mark(s) \leftarrow True$;

8 Determine, aleatoriamente, uma estrutura de vizinhança $N_i \in \{N_1, \dots, N_r\}$;

9 Determine, aleatoriamente, uma solução $s' \in N_i(s)$;

10 **Para** (cada vizinho $s'' \in N_i(s')$) **Faça**

11 $D^* \leftarrow$ soluções não-dominadas de $D^* \cup \{s''\}$;

12 **Fim_para**;

13 **Se** (todas as soluções de D^* estão marcadas como visitadas) **então**

14 Remova a marcação de todas as soluções de D^* ;

15 **Fim_Se**;

16 **Fim_Enquanto**;

17 **Retorne** D^* ;

Fim Algoritmo;

O método proposto tem como parâmetros de entrada o número de estruturas de vizinhança (r) e o critério de parada. Ele inicia com a geração de três soluções (s_1 , s_2 e s_3), cada uma delas obtida utilizando um critério de prioridade diferente. Para a geração do conjunto inicial de soluções não-dominadas, foi utilizado o método serial de geração de sequenciamentos (Kolisich (1996)), e foram utilizados três diferentes tipos de regras de prioridade: menor tempo de execução, maior número de atividades sucessoras e menor demanda por recursos. As três soluções são, então, comparadas entre si e, as não-dominadas são armazenadas no conjunto D^* .

Da mesma forma que Geiger (2008), a cada iteração da busca local seleciona-se aleatoriamente uma solução não visitada $s \in D^*$, sendo esta marcada como visitada ($Mark(s) \leftarrow True$), e uma estrutura de vizinhança $N_i \in \{N_1, \dots, N_r\}$. Foram utilizadas duas estruturas de vizinhança ($r = 2$): vizinhança de troca ($N_1(s)$), que consiste na escolha de duas atividades para serem trocadas de posição no sequenciamento, e vizinhança de inserção ($N_2(s)$), que consiste em deslocar uma atividade para outra posição, diferente da sua, dentro do sequenciamento. A vizinhança $N_1(s)$ é composta por $n(n - 1)/2$ soluções e a vizinhança $N_2(s)$ é composta por $(n - 1)^2$ soluções, no qual n é o número de atividades do problema.

Em seguida, é determinada aleatoriamente uma solução $s' \in N_i(s)$ e, o conjunto D^* é atualizado através da avaliação de todas as soluções vizinhas $s'' \in N_i(s')$. Por fim, é verificado se todas as soluções pertencentes a D^* estão marcadas como visitadas e, em caso afirmativo, a marcação é removida de todas. Este procedimento é repetido até que o critério de parada seja satisfeito, quando o método retorna o conjunto de soluções não-dominadas D^* .

5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

O método proposto nesse trabalho foi implementado computacionalmente na linguagem C e executado em um computador Intel Core i7 3.60GHz e 16GB de RAM, sob sistema operacional Linux Ubuntu 16.04.

O parâmetro critério de parada adotado para o método é baseado no número máximo de soluções geradas. Na literatura, esse critério é muito utilizado em algoritmos mono e multi-objetivos, como pode ser visto em Deiranlou e Jolai (2009), Ballestín e Blanco (2011), Agarwal *et al.* (2011), dentre outros. A eficiência das metaheurísticas depende fortemente dos valores escolhidos para seus parâmetros. Visto isso, a *response surface methodology* (Meyers *et al.* (2009)) foi utilizada para calibrar o parâmetro. Para a determinação do valor para o critério de parada, o método foi executado utilizando 120 instâncias, com 30, 60, 90 e 120 atividades, retiradas do *project scheduling problem library* (PSPLib), criado por Kolisch e Sprecher (1996). O valor determinado para o parâmetro foi 2300 soluções.

Como o método apresenta algumas escolhas aleatórias, o mesmo foi executado dez vezes, com dez sementes diferentes. A partir das soluções obtidas nas dez execuções, determinou-se o conjunto de soluções não-dominadas para o problema-teste utilizado, descrito na seção a seguir.

5.1 Problema-teste Analisado

Foi considerada para avaliar o método proposto, a resolução de um caso real de um projeto de construção, composto por 37 atividades e somente um recurso recuperável (mão de obra), disponível em Chen e Wheng (2009). Um recurso recuperável é aquele que, após ser utilizado na execução de uma atividade, pode ser utilizado na execução de outras. O projeto apresenta relações de precedência entre as atividades e disponibilidade limitada do recurso. Os autores consideraram 12 trabalhadores como disponibilidade de mão de obra. No projeto é possível obter, também, as durações (em dias) e as demandas por mão de obra das atividades, e os custos CD e CI. O CD é relacionado à utilização do recurso e, o CI à administração do projeto, ambos diários e em dólar. Algumas atividades apresentam dois modos de execução. A consideração de múltiplos modos de execução torna o problema mais realista e abrangente, mas resulta em um aumento no número de variáveis. Esse mesmo projeto foi utilizado em outros trabalhos, como por exemplo, El-Abbasy *et al.* (2016) e Liu *et al.* (2017).

Visando analisar a relação da disponibilidade de recursos com a duração e os custos do projeto, foi proposto um novo cenário, considerando 15 trabalhadores como disponibilidade de mão de obra.

5.2 Apresentação e Análise dos Resultados

Para a obtenção dos resultados apresentados a seguir, da mesma forma que em Chen e Wheng (2009), o CD foi calculado como o custo de utilização do recurso mão de obra e, o CI como um custo fixo diário. O custo unitário de utilização da mão de obra foi 100 dólares por dia e o custo fixo diário foi 600 dólares.

Na Tabela 1 são apresentadas as soluções obtidas para o cenário 1 do problema, ou seja, com a disponibilidade de mão de obra igual a 12 trabalhadores. Para tal cenário o método proposto obteve 16 soluções não-dominadas.

Tabela 1: Soluções obtidas para o cenário 1

Soluções	Duração	CD	CI
1	200	854200	120000
2	234	817200	140400
3	204	845100	122400
4	227	820400	136200
5	206	841300	123600
6	205	841900	123000
7	209	835400	125400
8	226	821700	135600
9	231	818400	138600
10	225	824000	135000
11	224	824500	134400
12	221	826700	132600
13	203	852300	121800
14	218	829700	130800
15	220	827400	132000
16	230	819700	138000

Como pode ser visto na Tabela 1, a solução com os menores valores para a duração e o CI é a primeira, com valores iguais a 200 dias e 120000 dólares, respectivamente. Já em relação ao CD, a solução com menor valor é a segunda, com um custo igual a 817200 dólares. Entretanto, a segunda solução é a que apresenta os piores resultados para a duração (234 dias) e o CI (140400 dólares).

As Figuras 2 e 3 apresentam gráficos relacionando a duração do projeto com seus custos CD e CI, respectivamente.

Com base na Figura 2, verifica-se que o CD do projeto diminui à medida que sua duração aumenta. Já para o CI, como pode ser visto na Figura 3, esse aumenta à medida que a duração também aumenta. Esses resultados confirmam a teoria descrita na Seção 2.3.

Na Tabela 2 são apresentadas as soluções obtidas para o cenário 2 do projeto, ou seja, com a disponibilidade de mão de obra igual a 15 trabalhadores. Para tal cenário o método proposto obteve 8 soluções não-dominadas.

Constata-se na Tabela 2 que a solução com os menores valores para a duração e o CI do projeto é a oitava, com valores iguais a 193 dias e 115800 dólares, respectivamente. O valor obtido para a duração é o mínimo possível, considerando as restrições do problema. Em relação

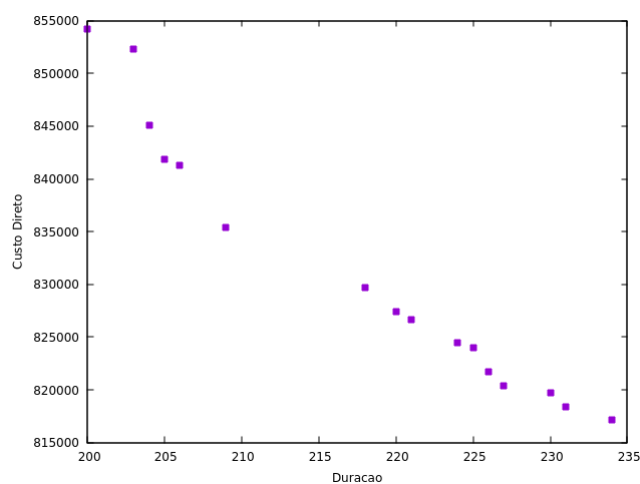


Figura 2: Duração x CD - Cenário 1

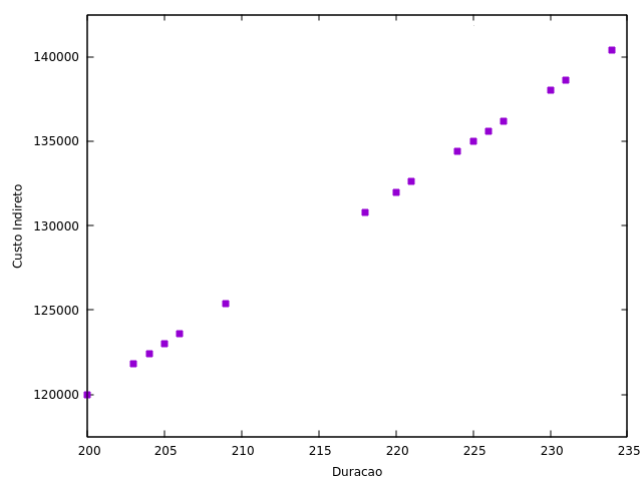


Figura 3: Duração x CI - Cenário 1

Tabela 2: Soluções obtidas para o cenário 2

Soluções	Duração	CD	CI
1	202	860700	121200
2	205	857800	123000
3	214	846700	128400
4	198	866100	118800
5	211	850000	126600
6	197	866200	118200
7	194	867200	116400
8	193	867700	115800

ao CD, a solução com menor valor é a terceira, com um custo igual a 846700 dólares. Como no cenário 1, a terceira solução foi a com os priores valores para a duração (214 dias) e o CI (128400 dólares).

Nas Figuras 4 e 5 podem ser vistos gráficos relacionando a duração do projeto com seus custos CD e CI, respectivamente.

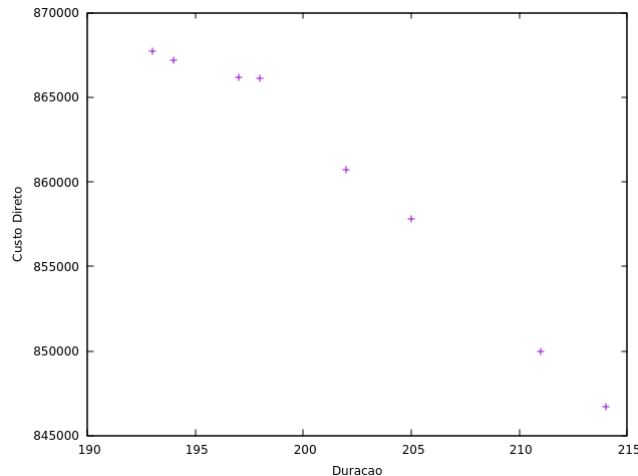


Figura 4: Duração x CD - Cenário 2

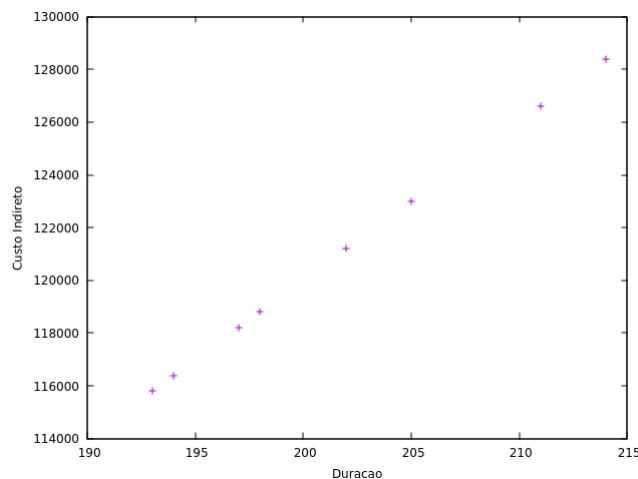


Figura 5: Duração x CI - Cenário 2

Da mesma forma que ocorreu para o cenário 1, o CD do projeto diminuiu à medida que a duração aumentou (Figura 4) e o CI aumentou à medida que a duração também aumentou (Figura 5), comprovando novamente a teoria descrita na Seção 2.3.

Comparando as soluções obtidas para os dois cenários, pode-se observar que três unidades disponibilizadas a mais de mão de obra gerou uma redução de 7 dias (3,5%) na duração do projeto, considerando as melhores soluções obtidas para esse objetivo. Levando em conta os valores médios, a redução foi de 20,5 dias (9,3%). Em relação ao CD, considerando as melhores soluções, o aumento foi de 29500 dólares (3,5%). Comparando os valores médios, o aumento foi de 36350 dólares (4,2%). Já em relação ao CI, considerando os valores mínimos e médios, a redução foi de 4200 dólares, 3,5% e 9,3%, respectivamente.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados gráficos comparando as relações da duração com o CD e o CI para os dois cenários.

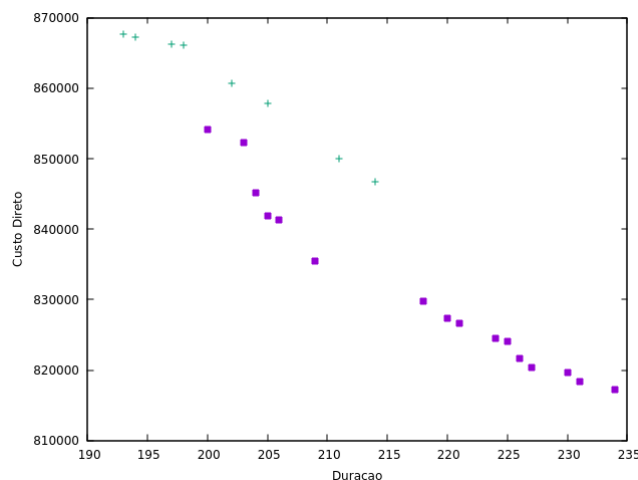


Figura 6: Comparação Duração x CD

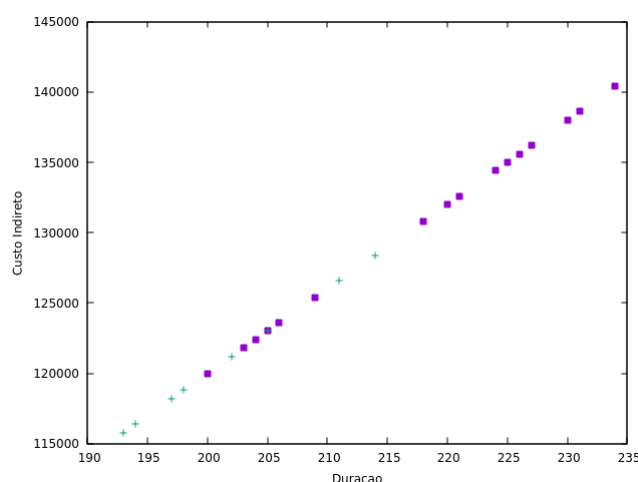


Figura 7: Comparação Duração x CI

Como pode ser visto nas Figuras 6 e 7, as soluções obtidas para o cenário 2 apresentam, na maioria dos casos, valores menores para a duração e para o CI, porém apresentam valores maiores para o CD. Esses valores se justificam pela forma como foram calculados os custos. Pode-se verificar, também, que o CD é um objetivo conflitante com a duração e com o CI.

Levando em consideração as melhores soluções obtidas para os dois cenários em relação à duração do projeto, verifica-se um aumento de 13500 dólares no CD e uma redução de 4200 dólares no CI, totalizando um aumento de 9300 dólares no CT. Sendo assim, é preciso analisar a viabilidade ou não da disponibilização de 3 trabalhadores a mais, o que geraria uma redução de 7 dias na duração e, em contrapartida, um aumento de 9300 dólares no CT do projeto.

Visto isso, cabe ao gestor do projeto escolher a solução mais adequada para cada situação. Caso a duração do projeto e/ou o CI deva(m) ser priorizado(s), é interessante a maior disponibilidade de mão de obra e a solução escolhida seria a oitava do cenário 2. Por outro lado, se o

CD precisa ser priorizado, não é interessante a maior disponibilização do recurso, e a solução escolhida seria a segunda do cenário 1. Porém, se nenhum dos três objetivos for priorizado, o gestor deverá escolher uma das soluções intermediárias, tentando equilibrar seus valores.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um método baseado na metaheurística VNS para a determinação de soluções para o problema de sequenciamento de atividades em projetos. O problema foi abordado com restrições de recursos e de precedência entre as atividades e foi formulado como um problema multi-objetivo, considerando dois objetivos: duração e custos (direto e indireto). A solução desse problema pode auxiliar os gestores de projetos nas tomadas de decisões, tornando-as mais acertadas. Na resolução de problemas de otimização multi-objetivo são geradas soluções com diferentes contrapartidas entre os distintos objetivos, sendo necessário que o gestor escolha a solução que melhor atenda às necessidades do projeto.

Para exemplificar a aplicabilidade do método desenvolvido, foi utilizado um projeto real de construção civil encontrado na literatura. Para isso foram propostos dois cenários, diferindo-se pela disponibilidade do recurso mão de obra. Com base nos resultados obtidos pelo método para os dois cenários do projeto, foi possível analisar a influência da disponibilidade de recursos em relação aos objetivos adotados.

Conforme era esperado, e descrito na literatura, o método obteve, para o cenário cujo projeto apresentava maior disponibilidade de mão de obra, soluções com valores melhores para a duração e para o CI. Porém, obteve para esse cenário piores valores para o CD. Com isso, cabe ao gestor do projeto escolher a solução mais adequada para cada situação, podendo priorizar um ou outro objetivo. Porém, se nenhum dos objetivos for priorizado, o gestor deverá escolher uma das soluções intermediárias, analisando economicamente cada uma delas.

Finalmente, pode-se concluir que o método proposto foi eficiente, obtendo soluções condiscentes com a literatura e com baixo esforço computacional. Os resultados obtidos podem servir de base para os gestores tomarem decisões, reduzindo os erros e falhas que ocorrem na elaboração de projetos.

Como propostas para trabalhos futuros, temos a criação e análise de mais cenários com maior e/ou menor disponibilidade do recurso. Para comparar a qualidade das soluções obtidas, outros métodos, baseados em outras metaheurísticas, podem ser propostos. Os métodos podem ser comparados através de métricas de avaliação desempenho e, técnicas estatísticas podem ser utilizadas para comprovar se há diferença significativa entre eles.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto pelo apoio e incentivo no desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

Agarwal A., Colak, S., Erenguc, S., 2011. A Neurogenetic Approach for the Resource constrained Project Scheduling Problem. *Computers & Operations Research*, vol. 38, pp. 44-50.

- Backer, K. R., 1974. *Introduction to Sequencing and Scheduling*. John Wiley.
- Balas, E., 1967. Project Scheduling with Resource Constraints. *Operational Research*, vol. 15, pp. 915-957.
- Ballestín, F., Blanco, R., 2011. Theoretical and Practical Fundamentals for Multi-objective Optimization in Resource constrained Project Scheduling Problems. *Computers & Operations Research*, vol. 38, pp. 51-62.
- Brucker, P., Knust, S., Schoo, A., Thiele, O., 1998. A Branch and Bound Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 107, pp. 272-288.
- Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K., Pesch, E., 1999. Resource-constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models, and Methods. *European Journal of Operational Research*, vol. 112, pp. 3-41.
- Brucker, P., Knust, S., 2000. A Linear Programming and Constraint Propagation-Based Lower Bound for the RCPSP. *European Journal of Operational Research*, vol. 127, pp. 355-362.
- Carrier, J., Néron, E., 2003. On Linear Lower Bound for the Resource Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 149, pp. 314-324.
- Chen, P., Weng, H., 2009. A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling. *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 485-498.
- Chistodolou, S., 2009. Construction Imitating Ants: Resource-unconstrained Scheduling with Artificial Ants. *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 285-293.
- Deiranlou, M., Jolai, F., 2009. A New Efficient Genetic Algorithm for Project Scheduling under Resource Constraint. *World Applied Science Journal*, vol. 7, pp. 987-997.
- El-Abbasy, M. S., Elazouni A. & Zayed T., 2016. MOSCOPEA: Multi-objective construction scheduling optimization using elitist non-dominated sorting genetic algorithm. *Automation in Construction*, vol. 71, pp. 153-170.
- Garey, M. R., Jonhson, D. S., 1979. *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman and Company.
- Geiger, M. J., 2008. Randomized variable neighborhood search for multi objective optimization. *Proceedings of the 4th EU/ME Workshop: Design and Evaluation of Advanced Hybrid Meta-Heuristics*, pp. 34-42.
- Geyer, P., 2009. Component-oriented Decomposition for Multidisciplinary Design Optimization in Building Design. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 23, pp. 12-31.
- Gomes, H. C., Neves, F. A., Souza, M. J. F., 2014. Multi-objective Metaheuristic Algorithms for the Resource-constrained Project Scheduling Problem with Precedence Relations. *Computers & Operations Research*, vol. 44, pp. 92-104.
- Hendrickson, C., 2008. *Project Management for Construction: Fundamental Concepts for Owners, Engineers, Architects and Builders*, Prentice Hall.
- Kelley, J. E., 1963. The Critical Method: Resources Planning and Scheduling. *Industrial Scheduling*, vol. 13.

- Kolisch R., 1996. Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation. *European Journal of Operational Research*, vol. 90, pp. 320-333.
- Kolisch, R., Sprecher, A., 1996. PSPLIB - A Project Scheduling Problem Library. *European Journal of Operational Research*, vol. 96, pp. 205-216.
- Koné, O., Artigues, C., Lopez, P., Mongeau, M., 2009. Event-Based MILP Models for Resource-Constrained Project Scheduling Problems. *Computers & Operations Research*, vol. 38, pp. 3-13.
- König, M., Beibert, U., 2009. Construction Scheduling Optimization by Simulated Annealing. *Proceeding of the 26th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. Austin, Texas, Estados Unidos, pp. 183-190.
- Liang, Y. C., Chen, H. L., Tien, C. Y., 2009. Variable Neighborhood Search for Multiple-objective Parallel Machine Scheduling Problems. *Proceeding of the 8th International conference on Information and Management Science*. China, pp. 519-522.
- Liang, Y. C., Lo, M. H., 2010. Multiple-objective Redundancy Allocation Optimization using a Variable Neighborhood Search Algorithm. *Journal of Heuristics*, vol. 16, pp. 511-535.
- Liu, S., Wang, C., 2007. Optimization Model for Resource Assignment Problems of Linear Construction Scheduling Projects. *Automation in Construction*, vol. 16, pp. 460-473.
- Liu, Z., Yang, L., Deng, R., Tian, J., 2017. An effective approach with feasible space decomposition to solve resource-constrained project scheduling problems. *Automation in Construction*, vol. 75, pp. 1-9.
- Mladenovic, N. Hansen, P., 1997. Variable Neighborhood Search. *Computers and Operations Research*, vol. 24, pp. 1097-1100.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M., 2009. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, Wiley.
- Oguz, O., Bala, H., 1994. A Comparative Study of Computational Procedures for the Resource Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, vol. 72, pp. 406-416.
- Otoni, R. S., Arroyo, J. E. C. Santos, A. G., 2011. Algoritmo VNS Multiobjetivo para um Problema de Programação de Tarefas em uma Máquina com Janelas de Entrega. *XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Ubatuba, São Paulo, vol. 1, pp. 1-12.
- Paiva, A. E. C., Arroyo, J. E. C., Otoni, R. S., 2010. Uma Heurística VNS Multiobjetivo para o Problema de Sequenciamento de Tarefas em uma Máquina com Penalidades por Antecipação e Atraso e Fluxo Total. *XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. São Carlos, São Paulo, vol. 1, pp. 1-12.
- Pritsker, A., Watters, L., Wolfe, P., 1969. Multi-project Scheduling with Limited Resources: a zero-one Programming Approach. *Management Science*, vol. 16, pp. 93-108.
- Rogalska, M., Bozejko, W., Hejducki, Z., 2008. Time/Cost Optimization Using Hybrid Evolutionary Algorithm in Construction Project Scheduling. *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 24-31.