

AIMÉE BIONDO VERDINI

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANO DIRETOR NA
MINERAÇÃO**

São Paulo
2015

AIMÉE BIONDO VERDINI

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANO DIRETOR NA MINERAÇÃO

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo
2015

TF-2015
V584m

Sysno 2452332

FICHA CATALOGRÁFICA

#20150

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009999

Verdini, Aimée Biondo

Metodologia para otimização do plano diretor na mineração
/ A.B.Verdini – São Paulo, 2015, 45p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da
Universidade São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e
Petróleo.

1.layout de mina, 2.alocação de instalações,
3.otimização, 4.Metaheurística GRASP, 5.GQAP

Dedico este trabalho às minhas três grandes inspirações, Maurício, Giu e Yasmin.

AGRADECIMENTOS

A realização deste projeto não seria possível se eu não tivesse pessoas tão importantes ao meu lado.

Agradeço muito ao meu orientador Prof. Dr. Giorgio de Tomi, por me confiar um tema tão importante e desafiador; além de todo apoio, aprendizado e oportunidades.

Ao Engenheiro Álvaro Rezende, da Sociedade Extrativa Dolomia, que foi extremamente receptivo e me ajudou com muita prontidão.

Ao meu supervisor do estágio, Guilherme Vianna, e os outros colegas pelo apoio, compreensão e troca de conhecimento, sem os quais a realização desse trabalho teria sido muito mais difícil.

Aos meus amigos, tanto os politécnicos, que compartilharam o mesmo sentimento que o meu durante cinco árduos anos, como meus outros amigos, que mesmo não possuindo o conhecimento técnico sempre estiveram ao meu lado com uma palavra de incentivo e força. Muito obrigada.

Um agradecimento especial à minha irmã Yasmin Biondo Verdini, pelo amor e apoio incondicionais. Por vezes trocou suas próprias prioridades para me ajudar. Não tenho palavras que demonstrem minha gratidão.

E aos meus pais, Maurício Verdini e Giuseppa Biondo Verdini, que durante todos os meus anos não foram apenas pais, mas amigos e companheiros, mesmo quando meus ideais pareciam inatingíveis. Sempre estiveram ao meu lado para me ouvir e encorajar. À vocês, o meu mais sincero muito obrigada.

"Eu tentei 99 vezes e falhei. Mas na centésima tentativa eu consegui. Nunca desista de seus objetivos, mesmo que eles pareçam impossíveis. A próxima tentativa pode ser a vitoriosa." (Albert Einstein)

RESUMO

O rápido crescimento no tamanho e na complexidade dos problemas encontrados na indústria devido aos elevados índices de competitividade, ao avanço tecnológico e à maximização de ativos sustentáveis tem incentivado engenheiros, pesquisadores e economistas a obter soluções cada vez melhores e mais baratas para esses problemas. Na mineração novos equipamentos foram desenvolvidos para as operações unitárias específicas a fim de aumentar a produtividade. Em paralelo, grandes instalações de concentração foram construídas para maximizar a recuperação dos recursos minerais. Isto significa que uma operação de mineração tornou-se agora uma rede altamente complexa e atividades de fluxos, em que a interação entre os seus componentes está associada com ganhos e perdas de capital. No entanto, como novos equipamentos e operações de mineração foram introduzidos, a definição do *layout* de mina, ou plano diretor, tornou-se um desafio.

A técnica de otimização a ser utilizado é a Metaheurística GRASP (*Greed Randomized Adaptive Search Procedure*), a qual tem sido aplicada a diversos problemas de otimização industrial e de pesquisa operacional. O problema da atribuição quadrática generalizada (*generalized quadratic assignment problem - GQAP*) é aplicado a alocação de instalações (*facilities*), objetivo do estudo em questão. Essas instalações são atribuídas a determinada localidade, de acordo com suas distâncias e fatores como peso desta distância na operação e custo de alocação de determinada instalação em local específico. Levando tais aspectos como base, adicionado à exemplo de aplicação estrutura-se a metodologia para aplicação deste problema.

A metodologia estruturada pode ser aplicada ao algoritmo modelado para problemas GQAP, uma vez que se tenha acesso e domínio sobre ele.

Através da análise de possíveis resultados (se aplicado o algoritmo citado) é possível prever que a utilização do método GQAP para alocação de instalações atende às necessidades e problemas de otimização de processos em um empreendimento mineiro, aumentando a eficiência e diminuindo os custos da operação.

Palavras chaves: *Layout* de mina; Alocação de instalações; Otimização; Metaheurística GRASP; GQAP.

ABSTRACT

The rapid growth in the size and complexity of the problems encountered in industry due the high levels of competitiveness, technological progress and maximizing sustainable assets has encouraged engineers, researchers and economists to get better and cheaper solutions to these problems. In mining, new devices were developed for the specific unit operations in order to increase productivity, in parallel, large concentration facilities were built to maximize recovery of mineral resources. This means that a mining operation has now become a highly complex network flows and activities, in which the interaction between its components is associated with capital gains and losses. However, as new equipment and mining operations were introduced, defining the mine layout has become a challenge.

The optimization technique to be used is the metaheuristic GRASP (Greed Randomized Adaptive Search Procedure), which has been applied to various problems of industrial optimization and operations research. The problem of generalized quadratic assignment (generalized quadratic assignment problem - GQAP) is applied to the facilities allocation problem, the objective of this project. These facilities are assigned to a particular locality, according to their distances and factors such as weight of this distance in the operation and cost allocation set installation at specified location. Taking these aspects as a base, added to the example of application, the methodology for application of this problem can be structured.

The structured methodology can be applied to the patterned algorithm for GQAP problems, since the access and domain on it are possible.

Through the analysis of possible outcomes (if applied the algorithm) it is possible to predict that the use of GQAP method for allocating facilities meets the needs and process optimization problems in a mining enterprise, increasing its efficiency and reducing costs .

Key words: Mine layout; Facilities allocation; Optimization; GRASP Metaheuristics; GQAP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO DE UMA ETAPA DA FASE CONSTRUTIVA DO MÉTODO GRASP PARA O PROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO QUADRÁTICA GENERALIZADA.	19
FIGURA 2 - VISTA AÉREA DO EMPREENDIMENTO MINEIRO DA SOCIEDADE EXTRATIVA DOLOMIA	22
FIGURA 3 - VISTA AÉREA DA REGIÃO DAS INSTALAÇÕES DO EMPREENDIMENTO MINEIRO DA SOCIEDADE EXTRATIVA DOLOMIA.	23
FIGURA 4 - VISTA AÉREA ISOMÉTRICA DA REGIÃO DAS INSTALAÇÕES DO EMPREENDIMENTO MINEIRO DA SOCIEDADE EXTRATIVA DOLOMIA.....	23
FIGURA 5 - ENTRADA PARA ALGORITMO DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS GQAP.....	26
FIGURA 6 - DIVISÃO DOS LOCAIS PARA ALOCAÇÃO DAS INSTALAÇÕES.	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - INSTALAÇÕES E SUAS RESPECTIVAS ÁREAS.	24
TABELA 2 - DISTÂNCIA ENTRE AS INSTALAÇÕES.	25
TABELA 3 - PESO DE CADA INSTALAÇÃO PARA O PROCESSO.	28
TABELA 4 - CAPACIDADE DOS LOCAIS K.	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GQAP	<i>Generalized Quadratic Assignment Problem</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
QAP	<i>Quadratic Assignment Problem</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO.....	12
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3.1. PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	12
3.2. PROGRAMAÇÃO INTEIRA E MISTA	14
3.3. PROGRAMAÇÃO POR METAS	14
3.4. TÉCNICAS HEURÍSTICAS DE OTIMIZAÇÃO	16
3.4.1. <i>Métodos construtivos</i>	16
3.4.2. <i>Métodos de busca local</i>	16
3.4.3. <i>Metaheurísticas</i>	17
3.4.3.1.1. <i>Fase de construção</i>	19
3.4.3.1.2. <i>Busca local aproximada</i>	20
4. METODOLOGIA.....	21
5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO	22
5.1. RESULTADOS	30
5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	30
6. CONCLUSÕES	31
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento no tamanho e na complexidade dos problemas encontrados na indústria, na ciência e na economia, aliado aos elevados índices de competitividade, ao avanço tecnológico e à maximização de ativos sustentáveis tem incentivado engenheiros, pesquisadores e economistas a obter soluções cada vez melhores e mais baratas para esses problemas. Essa situação leva a significativos impactos econômicos e ambientais para a sociedade em geral, assim esses fatores têm impulsionado um rápido desenvolvimento dos modelos e das técnicas de otimização ao longo dos últimos anos, tornando a otimização mais presente. Os aspectos sustentáveis da solução a ser estudada neste projeto estão relacionados com a exigência de execução lucrativa e ambientalmente eficiente e sustentável de controlar operações em todas as atividades industriais.

Ao longo do último século, os métodos de mineração foram desenvolvendo-se constantemente. No início do século XX, a mineração era baseada principalmente na força humana em todas as atividades operacionais. Como a demanda por produtos minerais aumentou, novas técnicas de mineração tiveram de ser desenvolvidas para atendê-la. Esta situação trouxe um crescente nível de mecanização em todas as atividades operacionais na mineração.

Dentro deste contexto, a introdução de equipamento especializado na mineração tem tido um impacto significativo sobre a produção do ramo. Novos equipamentos foram desenvolvidos continuamente para as operações unitárias específicas, tais como perfuração, carregamento, transporte e concentração, a fim de aumentar a produtividade, em paralelo, grandes instalações de concentração foram construídas para maximizar a recuperação dos recursos minerais. Isto significa que uma operação de mineração se tornou agora uma rede altamente complexa de atividades de fluxos, em que a interação entre os seus componentes está associada com ganhos e perdas de capital.

No entanto, como novos equipamentos e operações de mineração foram introduzidos, a definição do *layout* da operação, ou plano diretor, tornou-se um desafio. Durante o planejamento do projeto, os engenheiros de minas estão mais preocupados com a posição da cava, a fim de maximizar a recuperação dos recursos minerais. A tomada de decisão sobre a localização das instalações industriais, tais como britagem, planta de concentração, escritórios, oficina e outros se baseia principalmente no senso comum e na experiência da equipe do projeto, mas nem sempre leva em consideração toda a logística, aspectos econômicos e ambientais da operação ao mesmo tempo. Não existem abordagens padronizadas que considerem métodos robustos de otimização para identificar a solução mais adequada para o *layout* das instalações na mineração. Muitos são os métodos de otimização utilizados para o planejamento de lavra, contudo pouco se estuda e se aplica ao plano diretor, tornando a otimização deste um desafio.

A proposta consiste no desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de modelo metaheurístico para otimização do *layout* da operação.

2. OBJETIVO

O objetivo desse projeto é estudar o problema de definição de *layout* de mina, ou seja, localização de suas instalações industriais, tais como britagem, planta de concentração, escritórios, oficina entre outros; e propor uma metodologia para a solução utilizando técnicas atuais de otimização.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão abordados os principais métodos de otimização, sendo estes métodos de solução baseados em programação linear e técnicas heurísticas de otimização.

Os métodos de otimização são utilizados para resolução de diversos problemas que sejam caracterizados pela minimização ou maximização de uma ou mais funções objetivo, com uma ou mais variáveis de decisão em determinado domínio, sujeitas ou não a restrições. Entre esses principais problemas estão problemas de alocação de instalações, planejamento, blendagem, caixeiro viajante (*traveling salesman*), problema da mochila. (Martinhago, 2012)

3.1. PROGRAMAÇÃO LINEAR

São apresentados, a seguir, os conceitos básicos da programação linear e as suas variantes, a programação inteira mista e a programação linear por metas.

Segundo Costa (2005), a programação linear tem a função fundamental de encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representados por equações lineares. Ela consiste na maximização ou minimização de uma função linear, denominada função objetivo, respeitando um sistema linear de igualdades ou desigualdades, cujo nome é "restrição do modelo". As restrições representam normalmente limitações de recursos disponíveis ou exigências e condições que devem ser cumpridas no problema.

Estas restrições do modelo determinam uma região, denominada "conjunto das soluções viáveis". A melhor das soluções, aquela que maximiza ou minimiza a função objetivo é chamada de solução ótima. Um problema de programação linear deve ser equacionado obtendo-se um modelo que será, então, reduzido à forma-padrão para que seja permitida a aplicação de algoritmos que determinem a solução ótima para o problema. Para resolução de problemas de programação linear simples, entre os algoritmos mais utilizados estão o SIMPLEX, pontos interiores e o método do elipsóide.

As equações abaixo apresentam a formulação necessária para que um problema de programação linear esteja na forma padrão. (Bregalda et al).

$$\min \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{i=1}^m (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) = Q(x) \quad (1)$$

$$\text{s.a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - d_i^+ + d_i^- = b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5)$$

Em que:

- $j = 1, \dots, n$ representam atividades a serem realizadas;
- c_j é o custo associado à j -ésima atividade;
- x_j é uma variável de decisão que quantifica o nível de operação da j -ésima atividade;
- $i = 1, \dots, m$ representam restrições a serem observadas;
- b_i representa a quantidade de recursos disponíveis ou exigências a serem cumpridas;
- a_{ij} representa a quantidade de recurso i (ou exigência) em uma unidade da atividade j .

A equação (1) representa a função objetivo, cujo intuito é minimizá-la. As equações (2) a (5) representam as restrições do problema de programação linear. As soluções que satisfazem ao conjunto de restrições desse problema são as denominadas soluções viáveis. Quando o conjunto de soluções viáveis do problema de programação linear é não-vazio, garante-se a existência de pelo menos uma solução ótima. (Costa, 2005)

O método SIMPLEX, algoritmo mais utilizado para resolução de problemas de programação linear, baseia-se na propriedade de que a solução ótima do problema, caso exista, ocorre em um vértice (chamado de solução básica viável) do polítopo formado pelo conjunto das soluções viáveis do problema. Assim, o método consiste em gerar, a cada iteração, soluções básicas viáveis cada vez melhores. Quando não é mais possível melhorá-la, a última solução obtida é considerada a solução ótima do problema. (Costa, 2005.)

Entre os principais tipos de problemas em que a Programação Linear simples é mais aplicada e indicada estão alocação, blendagem, planejamento e escalonamento.

3.2. PROGRAMAÇÃO INTEIRA E MISTA

Segundo Loesch e Hein (1999) os problemas de programação inteira e mista, ou também denominados programação discreta, são a princípio, estruturados do mesmo modo que os problemas de programação linear, entretanto possuem pelo menos uma restrição de integralidade. Restrições de integralidade impõem que as variáveis assumam valores inteiros. Os problemas que possuem todas as variáveis inteiras são os chamados "problemas de programação inteira", enquanto que aqueles que contêm pelo menos uma variável inteira associada a variáveis não-inteiras são denominados "problemas de programação mista".

A técnica geralmente aplicada na resolução destes problemas é conhecida como técnica de ramificação e limite, ou *Branch-and-Bound*, em que é inicialmente resolvido o problema como se fosse puramente de programação linear, ou seja, como se não houvesse restrições de integralidade. Se obtida uma solução ótima limitada, que satisfaça as restrições de integralidade do problema, então essa solução é considerada "ótima" para o problema de programação inteira e mista, e o procedimento chega ao fim. Se a solução encontrada for ilimitada ou impossível, o procedimento também pode ser finalizado. Se a solução encontrada violar no mínimo uma restrição de integralidade então há a divisão do problema em dois novos problemas de programação linear. Esse processo de divisão pode ser aplicado repetidas vezes, criando-se uma árvore binária de busca da solução. Cada um dos dois novos problemas gerados pela divisão possui a mesma função objetivo e restrições do problema pai, adicionando-se a cada novo problema uma restrição, tomando-se como base os dois inteiros mais próximos da variável não-inteira que corresponde à restrição de integralidade violada. O procedimento continua até que não seja possível criar mais ramificações, ou seja, nenhuma restrição de integralidade for violada ou o espaço de soluções for vazio. (Costa, 2005). Outras técnicas aplicadas a problemas de Programação Inteira e Mista conhecidas são *Cutting plane*, *Branch-and-cut* e Relaxação.

3.3. PROGRAMAÇÃO POR METAS

A programação por metas ou *Goal Programming* é apresentada por Bueno e Oliveira (2004), como uma técnica de pesquisa operacional que permite a modelagem e a busca de soluções para problemas com múltiplos objetivos ou metas a serem atingidas. Esta é uma situação bastante encontrada na realidade de empresas, portanto, amplamente utilizada.

Assim, a programação por metas pode ser dita e caracterizada como uma extensão da programação linear, a fim de que se permita a solução simultânea de um sistema com múltiplas metas, podendo apresentar unidades de medidas diferentes. Nesse tipo de programação, a função de avaliação é definida como a minimização dos desvios em relação às metas e passam a ter inclusão de variáveis de desvio, ampliando o espaço de soluções viáveis. Com isso, permite-se que as variáveis de decisão assumam valores que otimizem, de modo geral, o problema, sendo possível avaliar o quanto uma restrição fica fora da meta em relação às

demaís. O algoritmo mais utilizado para esse tipo de programação é o MINMAX (Romero, 2004)

Seja o problema genérico de programação por metas representado pelas equações abaixo correspondente à relaxação da restrição do modelo de programação linear apresentado anteriormente (Costa, 2005).

$$\min \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{i=1}^m (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) = Q(x) \quad (6)$$

$$\text{s.a: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - d_i^+ + d_i^- = b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (10)$$

Nesta formulação, semelhante ao problema de programação linear, têm-se:

- $j = 1, \dots, n$ representam atividades a serem realizadas;
- $i = 1, \dots, m$ representam restrições a serem observadas;
- b_i a meta de recursos a serem utilizados ou exigências a serem alcançadas;
- c_j o custo da j -ésima atividade;
- a_{ij} é a quantidade de recurso i (ou exigência) em uma unidade da atividade j .

Neste modelo, x_j , d_i^+ e d_i^- representam variáveis de decisão, sendo que x_j quantifica o nível de operação da j -ésima atividade; d_i^+ , sendo o desvio positivo do recurso (ou exigência) i , quantifica o quanto a meta b_i foi superada e d_i^- , denotada por desvio negativo, quantifica o quanto falta para atingir a meta b_i . As constantes w_i^+ e w_i^- indicam, as prioridades dos i -ésimos desvios positivo e negativo em relação à meta. Os desvios, positivos e negativos, são, portanto, variáveis de decisão que medem o quanto o conjunto de restrições será violado em relação à meta expressa por b_i . (Costa, 2005)

A equação (6) representa a função multiobjetivo que incorpora os desvios, e suas prioridades e estas que devem ser minimizados. As demais equações, numeradas de (7) a (10) representam as restrições do problema, incluindo condições de não negatividade das variáveis de decisão.

3.4. TÉCNICAS HEURÍSTICAS DE OTIMIZAÇÃO

Segundo Costa, 2005 e Martinhago, 2012, as técnicas heurísticas de otimização incluem principalmente os métodos construtivos, métodos de busca local, método de descida, método randômico de descida e a mais utilizada, a Metaheurística.

Segundo Martinhago, 2012, heurísticos são quaisquer princípios ou conceitos que contribuam para reduzir o tempo médio gasto na busca de uma solução.

3.4.1. Métodos construtivos

De acordo com Costa, 2005, o método construtivo tem por objetivo gerar uma solução elemento por elemento, sendo que a forma de escolha de cada elemento a ser inserido a cada passo varia de acordo com o método, o qual depende do problema abordado. A solução gerada por este método pode não ser satisfatória, indicando necessidade de refinamento após a construção.

Uma das formas de se gerar a solução pelo método construtivo é conhecida como gulosa, descrita por Costa, 2005 e Resende e Silva, 2013. Esta faz com que seja inserido o elemento, pertencente ao conjunto de elementos ainda não selecionados que traz o maior benefício para a solução, contudo acaba por produzir soluções sem diversidade e requer um maior tempo computacional para o refinamento da solução.

Outra forma comum de se gerar uma solução inicial é sua construção de maneira aleatória, ou seja, a cada passo um elemento a ser inserido na solução é aleatoriamente selecionado do conjunto de elementos não selecionados. É uma forma simples de se implementar e com grande diversidade de soluções, contudo a qualidade da solução final é baixa, exigindo refinamento. (Costa, 2005)

3.4.2. Métodos de busca local

As técnicas de busca local, ou métodos de refinamento, baseiam-se no conceito de vizinhança, ou seja, parte-se de uma solução inicial e exploram-se as soluções que podem ser alcançadas em um movimento, de acordo com regras bem definidas.

A eficiência desse método depende da qualidade da solução construída. O procedimento de construção tem então um papel importante na busca local, uma vez que soluções construídas constituem bons pontos de partida para a busca local, permitindo assim acelerá-la. (Costa, 2005)

Os métodos de busca local são classificados em "Método de Descida", "Método Randômico de Descida" e "Método Randômico Não Ascendente".

3.4.3. Metaheurísticas

As Metaheurísticas são procedimentos destinados a encontrar uma boa solução, eventualmente a solução ótima, consistindo na aplicação, de uma heurística subordinada a cada passo. Esta deve ser modelada especificamente para cada tipo de problema. Diferentemente às heurísticas convencionais, as Metaheurísticas são de caráter geral e tem as seguintes características distintas dos métodos de busca local: (Costa, 2005)

- Critério de escolha de uma solução inicial;
- Definição da vizinhança $N(s)$ de uma solução s ;
- Critério de seleção de uma solução vizinha dentro de $N(s)$;
- Critério de parada.

Embora os métodos heurísticos não garantam que uma solução ótima venha a ser encontrada, os benefícios dos tempos adequados de computação e de necessidade de memória, uma boa representação da realidade e uma qualidade satisfatória de resolução são razões para adotar a abordagem heurística para o problema de localização das instalações. (Martinhago, 2012).

3.4.3.1. Metaheurística GRASP

A metaheurística GRASP, desenvolvida por Feo e Resende (1995), é um método iterativo composto pelas fases de construção e de busca local. Na fase de construção, um conjunto de soluções de boa qualidade é gerado através de uma mistura de gulosidade e aleatoriedade. A fase de busca local tenta melhorar a solução encontrada na fase de construção.

Em cada iteração, uma solução é encontrada, sendo a melhor entre elas a solução final do problema. A busca local substitui repetidamente a solução atual por uma solução mais adequada da vizinhança. Se não há uma melhor solução, a solução atual é declarada um mínimo local e a busca cessa. A melhor "mínimo local" encontrada em todas as iterações GRASP é a saída e considerada a solução da função. (Araujo; Cabral e Nascimento, 2008).

A metaheurística GRASP tem sido continuamente desenvolvida e sendo aplicada a diversas áreas, em problemas de otimização industrial e de pesquisa operacional, entre eles problemas em escalonamento, roteamento, lógica, particionamento, localização e *layout*, atribuição, manufatura, transporte, telecomunicações, desenho automático, sistema de potência elétrico, projeto VLSI, entre outros. (Araujo; Cabral e Nascimento, 2008)

O problema de atribuição quadrática generalizada (*Generalized Quadratic Assignment Problem* - GQAP) é uma generalização do problema NP- Difícil da atribuição quadrática (*Quadratic Assignment Problem* - QAP). Este é um problema

em desenvolvido a partir que a metaheurística GRASP. Nele múltiplas instalações (*facilities*) podem ser atribuídas a uma mesma localidade, na medida em que a capacidade destas localidades permita. (Resende e Silva, 2013)

A estruturação do problema se dá basicamente pelo número de instalações, sendo $N = \{1, \dots, n\}$ um conjunto de instalações (*facilities*) e pelo número de localidades (*sites*) em que essas instalações podem ser alocadas, sendo $M = \{1, \dots, m\}$ um conjunto de localidades. Além disso, são necessárias e consideradas *input* para o problema as seguintes considerações:

- $A_{n \times m} = (a_{ii'})$, o fluxo entre as instalações $i \in N$ e $i' \in N$, tal que $a_{ii'} \in \mathbb{R}^+$, se $i \neq i'$, e $a_{ii'} = 0$, em caso contrário;
- $B_{m \times n} = (b_{jj'})$, a distância entre as localidades $j \in M$ e $j' \in M$, tal que $b_{jj'} \in \mathbb{R}^+$, se $j \neq j'$, $b_{jj'} = 0$, em caso contrário;
- $C_{n \times m} = (c_{ij})$, o custo de atribuir a instalação $i \in N$ à localidade $j \in M$, tal que $c_{ij} \in \mathbb{R}^+$;
- $z \in \mathbb{R}^+$, um fator de escala denominado custo por unidade de tráfego;
- $Q_j \in \mathbb{R}^+$, a capacidade de localização $j \in M$.

Dessa maneira, o problema da atribuição quadrática generalizada, *GQAP*, consiste em encontrar $X_{n \times m} = (x_{ij})$, com $x_{ij} = \{0, 1\}$, em que a instalação $i \in N$ é atribuída a localidade $j \in M$ se e somente se $x_{ij} = 1$, de modo que as restrições abaixo sejam satisfeitas e finalmente, função objetivo seja minimizada. (Resende e Silva).

Restrições:

- $\sum_j x_{ij} = 1, i \in N(1)$
- $\sum_i q_i x_{ij} \leq Q_j, j \in M(2)$
- $x_{ij} \in \{0, 1\}, i \in N; j \in M(3)$

Função objetivo:

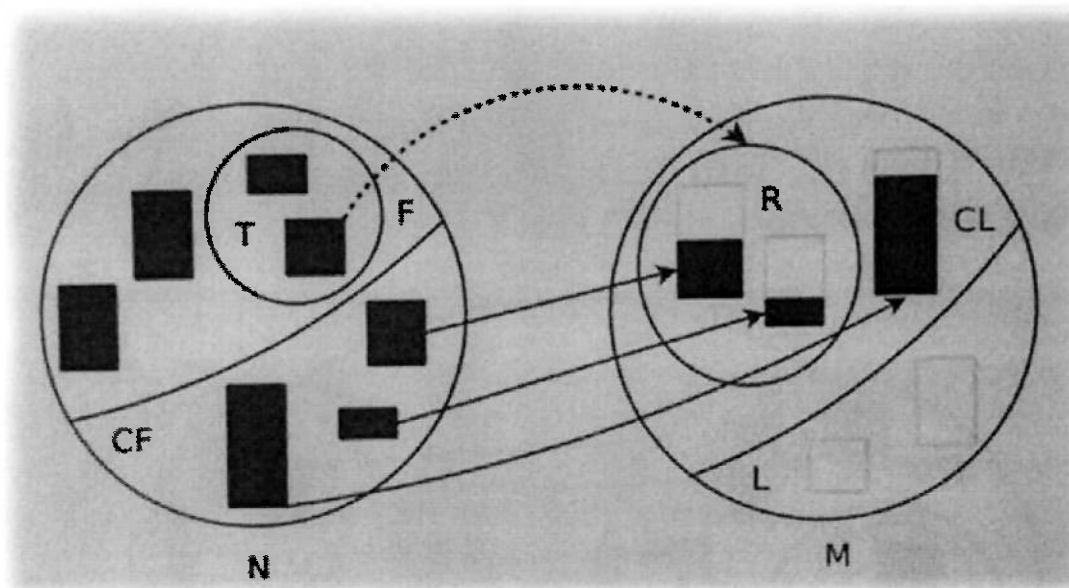
$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M} c_{ij} \cdot x_{ij} + z \cdot \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} \sum_{i' \in N, i' \neq i} \sum_{j' \in M} a_{ii'} \cdot b_{jj'} \cdot x_{ij} \cdot x_{i'j'}$$

A restrição (3) garante que cada instalação seja atribuída a exatamente uma localidade, enquanto a restrição (4) garante que a capacidade das localidades não será violada.

3.4.3.1.1. Fase de construção

De acordo com Costa, 2005 e Resende e Silva, 2013, suponha-se que uma solução parcial do problema da atribuição quadrática generalizada, ou seja, que um número de atribuições já tenha sido realizado. Para realização da próxima atribuição, o procedimento precisa selecionar uma nova instalação e uma localidade. As localidades são disponibilizadas uma por vez. O procedimento aleatoriamente determina se é para usar uma nova localidade ou alguma das localidades previamente escolhidas, favorecendo a nova localidade quanto mais as previamente selecionadas tenham capacidades disponíveis praticamente insuficientes. Se o procedimento determina que uma localidade previamente selecionada deva ser escolhida, então selecionam-se as instalações que podem ser atribuídas a localidade de máxima capacidade disponível, para em seguida escolher aleatoriamente uma instalação dentre estas. Das localidades que podem acomodar esta instalação, uma é selecionada aleatoriamente e a atribuição é realizada. Por outro lado, se não existem localidades, dentre as já selecionadas, com capacidade suficiente para acomodar uma instalação, uma nova localidade é selecionada aleatoriamente a partir do conjunto das localidades ainda não selecionadas.

Figura 1 - Ilustração de uma etapa da fase construtiva do método GRASP para o problema de atribuição quadrática generalizada.



Fonte: Resende e Silva, 2013

A figura 1 ilustra esse procedimento. Na figura, o conjunto N de instalações é particionado entre o conjunto CF de instalações atribuídas e o conjunto F das instalações não atribuídas. Da mesma forma, o conjunto M das localidades é particionado entre o conjunto CL das localidades previamente selecionadas e o conjunto L das localidades não selecionadas. As instalações em CF devem ser atribuídas às localidades em conjunto L das localidades não selecionadas. O subconjunto de instalações T consiste de todas as instalações não atribuídas com demanda menor ou igual à máxima capacidade disponível dentre as localidades em CL. Após uma instalação a partir de T ser aleatoriamente selecionada, o conjunto R consiste de todas as localidades previamente selecionadas capazes de acomodá-lo. Em seguida, uma localidade aleatoriamente selecionada a partir de R recebe esta instalação. (Resende e Silva, 2013)

3.4.3.1.2. Busca local aproximada

O procedimento construtivo da fase construtiva explicitada acima produz uma solução viável p que não é garantida ser localmente ótima. Um procedimento de busca local é então aplicado de início a p com o objetivo de encontrar um mínimo local aproximado. Esse procedimento utiliza duas estruturas de vizinhança denominadas *1-move* e *2-move*. Uma solução na vizinhança *1-move* de p é obtida pela mudança de uma atribuição instalação/localidade em p . De maneira semelhante, uma solução pertencente à vizinhança *2-move* de p se dá pela mudança simultânea de duas atribuições instalação/localidade em p . (Resende e Silva, 2013)

4. METODOLOGIA

A fim de se estudar a aplicação do método GQAP, descrito na seção 3, para otimização da alocação das instalações em uma área do empreendimento mineiro, estruturou-se a metodologia descrita a seguir.

A primeira etapa para desenvolvimento da metodologia consiste no conhecimento do empreendimento mineiro, incluindo as instalações, cava, e suas respectivas localizações. Assim, requer que se enumere e liste as instalações a serem alocadas, como por exemplo, britagem primária, britagem secundária, oficina, prédio administrativo, portaria, entre outros.

Uma vez listadas as instalações, serão mensuradas as áreas ocupadas por cada uma delas no espaço do empreendimento em estudo, além da área total (disponível) da mina ou operação em que se localizam tais instalações. Considera-se a área disponível para alocação das instalações uma região que esteja de acordo com as restrições legais e ambientais exigidas por Departamentos Nacionais e de Meio Ambiente, ou seja, a área que pode ser totalmente ocupada. Além disso, a cava é considerada uma condição de entrada, e sua direção de avanço também.

A seguinte etapa consiste na medição das distâncias entre as instalações, e a avaliação do chamado "fluxo" ou "peso" dessa distância. O peso da distância entre duas instalações reflete sua importância para a operação ou processo em questão. Isso implica, por exemplo, que as instalações com distância de maior peso devem estar mais próximas.

Uma vez desenvolvida a metodologia descrita, pode-se aplicar os dados em algoritmo modelado para problemas de alocação de instalações, que utilizam como base de sua programação o problema GQAP, descrito na seção 3.4.3.1. Para que esses dados possam ser compilados é necessário acesso e controle do algoritmo, o que não representa escopo do presente estudo.

Por fim, é importante ressaltar que as variáveis a serem consideradas devem ser variáveis discretas (não são aplicadas variáveis contínuas), físicas e pontuais, ou seja, unidades e instalações que ocupem um espaço físico propriamente dito.

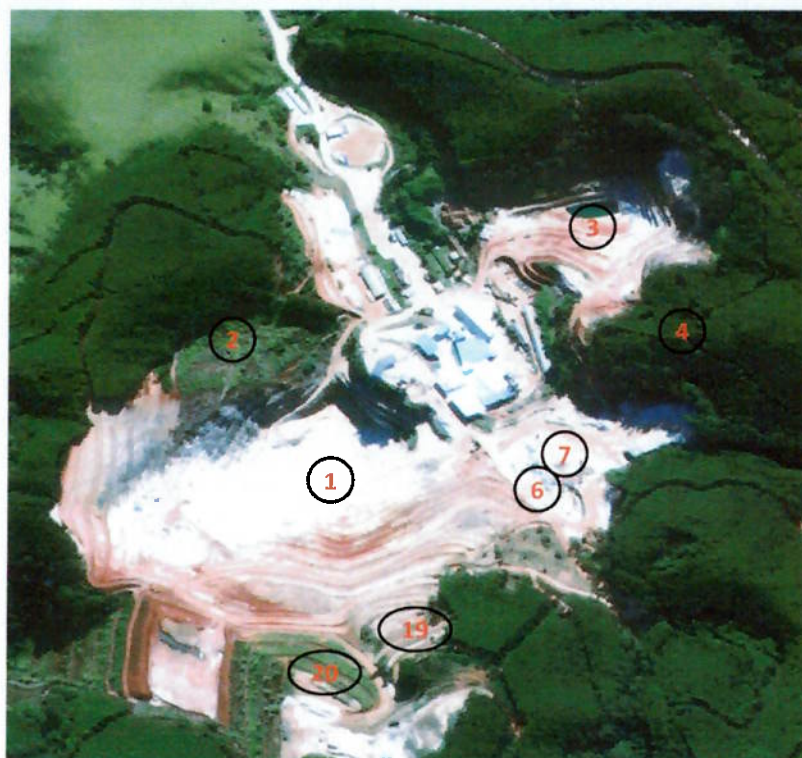
5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A fim de se exemplificar e desenvolver de maneira prática a metodologia descrita na seção 4 anteriormente, para aplicação do método, e possível simulação no algoritmo, foi realizado estudo em uma mina existente.

O empreendimento estudado foi a mina de calcário dolomítico, da Sociedade Extrativa Dolomia, localizada em Taubaté, São Paulo. O relatório de visita técnica, suporte para o desenvolvimento e coleta de dados que se segue, encontra-se em anexo (Apêndice A).

Primeiramente foram listadas as instalações e suas respectivas áreas, conforme seguem nas figuras 2, 3 e 4 e tabela 1.

Figura 2 - Vista aérea do empreendimento mineiro da Sociedade Extrativa Dolomia



Fonte: Google Earth modificada (acesso 22 de outubro de 2015)

Figura 3 - Vista aérea da região das instalações do empreendimento mineiro da Sociedade Extrativa Dolomia.



Fonte: Google Earth modificada (acesso 22 de Outubro de 2015)

Figura 4 - Vista aérea isométrica da região das instalações do empreendimento mineiro da Sociedade Extrativa Dolomia.



Fonte: Google Earth modificada (acesso 22 de outubro de 2015)

A área total do empreendimento para alocação das instalações descritas é de 604 mil m² considerando as cavas e suas áreas de expansão; e 67,7 mil m² se considerada apenas a área que contém as instalações.

Tabela 1 - Instalações e suas respectivas áreas.

Legenda	Instalação	Área (m²)
1	Cava 1 hoje	153,000.00
2	Cava 1 após avanço	250,000.00
3	Cava 2 hoje	40,000.00
4	Cava 2 após avanço	250,000.00
5	Acesso + Britagem primária+ pilha pulmão 1	3,200.00
6	Acesso + Britagem primária+ pilha pulmão 2	3,600.00
7	Acesso+ Britagem secundária (1) + 3 pilhas	4,100.00
8	Britagem secundária (2)	1,100.00
9	Britagem secundária (3)	1,900.00
10	Britagem terciária	2,600.00
11	Oficina + lavador	2,900.00
12	Galpão de estoque de equipamento	810.00
13	Pátio oficina (Fábrica)	2,250.00
14	Prédio administrativo (1)	400.00
15	Balanças	120.00
16	Prédio administrativo (2)	160.00
17	Portaria	240.00
18	Estacionamento carretas principal	3,200.00
19	Depósito de Estéril	50.00
20	Depósito de Estéril Futuro	65.00

Fonte: Elaboração própria

Com o intuito de se estudar a melhor localização das instalações no empreendimento, faz-se necessária análise das distâncias entre as instalações, bem como a importância dessa distância para execução do processo no empreendimento. A tabela 2 lista as instalações com suas respectivas distâncias e o peso desta distância, sendo a escala utilizada de 1 a 5, em ordem crescente de relevância.

Tabela 2 - Distância entre as instalações.

Instalação 1	Instalação 2	Distância (m)	Peso
Cava 1	Britagem Primária 1	600	5
Cava 1	Britagem Secundária 2	860	5
Britagem Primária 1	Britagem secundária 2	75	5
Britagem Primária 2	Britagem Secundária 2	35	5
Britagem Secundária 2	Britagem terciária	22	5
Fábrica	Manutenção	110	2
Fábrica	Prédio administrativo	190	1
Prédio administrativo	Portaria	240	3
Estacionamento carretas principal	Silos	415	4

Fonte: Elaboração própria

Com base nos dados coletados na visita técnica à mina Dolomia foi possível desenvolver a metodologia de maneira mais eficiente e prática e retirar os dados para utilização no algoritmo.

Para que o algoritmo possa ser aplicado a dados como os mostrados anteriormente faz-se necessária análise dos mesmos e adequação à linguagem de programação computacional, tornando prática a metodologia desenvolvida e explicada de maneira teórica na seção 4. A metodologia tem o intuito de tratar os dados e gerar o arquivo de entrada para o algoritmo, que têm a forma ilustrada na figura 5.

Figura 5 - Entrada para algoritmo de resolução de problemas GQAP.

```

n number of facilities
m number of sites
v unit traffic cost (default = 1)
for (i = 1; i <= n; i++) { for (j = 1; j <= n; j++) {t_ij, traffic
intensity between facilities i and j}} // note: in this
instance set the matrix is simmetric
for (h = 1; h <= m; h++) { for (k = 1; k <= m; k++) {d_hk,
distance between sites h and k}} // note: in this instance
set the matrix is simmetric
for (i = 1; i <= n; i++) { for (k = 1; k <= m; k++) {a_ik
installation cost facility i to site k}}
for (i = 1; i <= n; i++) {q_i, weight of facility i}
for (k = 1; k <= m; k++) {Q_k, capacity of site k}

```

Fonte: Orientações Prof. Ricardo Martins de Abreu Silva

- *n number of facilities*

O valor *n* expressa o número de instalações a serem avaliadas. Para essa aplicação serão consideradas 10 instalações (*n*= 10), sendo elas:

1. Cava 1 hoje
2. Cava 2 hoje
3. Acesso + Britagem primária + pilha pulmão (1)
4. Acesso + Britagem primária + pilha pulmão (2)
5. Acesso + Britagem secundária (1) + 3 pilhas
6. Britagem secundária (2)
7. Britagem secundária (3)
8. Fábrica
9. Manutenção
10. Estacionamento carretas principal

- *m number of sites*

O valor *m* expressa a quantidades de locais disponíveis na área considerada para a alocação das instalações em estudo. A fim de se separar de maneira eficiente o *m* "número de locais", dividiu-se a área total disponível pela área da maior instalação, assim, tornando todos os locais elegíveis a alocar qualquer uma das instalações. Dessa maneira, calcula-se:

$$m' = \frac{\text{Área total disponível para instalações}}{\text{Área da maior instalação}} = \frac{677.000}{4.100} = 16;$$

As cavas serão consideradas para essa exemplificação como instalações, devido à sua extrema importância para o estudo. Assim, tem-se:

$m = m' + \text{Local da Cava 1} + \text{Local da Cava 2};$

$m = 18.$

- *for (i = 1; i <= n; i++) { for (j = 1; j <= n; j++) {t_{ij}, traffic intensity between facilities i and j}} // note: in this instance set the matrix is symmetric*

Para esse *input* deve ser desenhada a matriz simétrica que mostre o "fluxo" ou "peso" entre cada uma das instalações *n* listadas.

A matriz encontra-se em anexo. (Apêndice B)

- *for (h = 1; h <= m; h++) { for (k = 1; k <= m; k++) {d_{hk}, distance between sites h and k}} // note: in this instance set the matrix is symmetric*

Para esse *input* deve ser desenhada a matriz simétrica que mostre a distância entre os locais "*m*" determinados anteriormente.

A matriz encontra-se em anexo (Apêndice C)

- *for (i = 1; i <= n; i++) { for (k = 1; k <= m; k++) {a_{ik} installation cost facility i to site k}}*

Para esse *input* deve ser desenhada a matriz que mostre o custo de instalação de cada *facility* para determinado local.

A matriz encontra-se em anexo (Apêndice D)

- *for (i = 1; i <= n; i++) {q_i, weight of facility i}*

O valor "*q*" expressa o peso que determinada instalação tem para o processo ou instalação. Os pesos utilizados, em ordem crescente de 1 a 10 são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Peso de cada instalação para o processo.

<i>i (facility)</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
weigh	10	10	5	5	5	5	5	5	2	1

Fonte: Elaboração própria

- *for (k = 1; k <= m; k++) {Q_k, capacity of site k}*

O valor de "Q" indica a capacidade de cada um dos locais, expressas nesse caso pela área calculada para cada um deles. Estes valores estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Capacidade dos locais k.

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Capacities (Q)	153000	40000	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100

k	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Capacities (Q)	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4900	4900

Fonte: Elaboração própria

Para que os locais e instalações pudessem ser entendidos com mais precisão, a figura 7 ilustra a divisão da área total disponível em locais, sendo eles numerados de 1 a 18.

Figura 6 - Divisão dos locais para alocação das instalações.

Fonte: Google Earth modificada (acesso 22 de Outubro de 2015)

Como citado anteriormente, uma vez que haja acesso ao algoritmo, utiliza-se os dados de entrada descritos, no formato adequado para a modelagem em que algoritmo se encontra. Para o caso em estudo, o programa devolve valores binários identificando a alocação de determinada instalação ($i = 1, 2, \dots, 10$) no "local" ($k = 1, 2, \dots, 18$) mais adequado.

5.1. RESULTADOS

A obtenção de resultados específicos não é escopo do presente estudo. Para que resultados formais sejam gerados é necessário domínio e acesso do algoritmo modelado em linguagem computacional.

Através da análise dos dados mostrados e tratados na seção 4.1, é possível esperar os alguns resultados expressivos:

1. A Cava 1 e Cava 2 certamente seriam alocadas respectivamente nos locais 1 e 2 devido ao altíssimo custo de alocação destas nos locais 3 a 18.
2. Cava 1 e Cava 2 são as instalações com maior peso para o processo, assim, serão alocadas em locais estratégicos e suas condições (como a descrita no item 1) terão maior peso sobre a decisão de seus locais.
3. Os "pesos" mais altos encontram-se entre as distâncias das instalações "Cava 1" e "Acesso + Britagem primária + pilha pulmão (1)"; "Cava 1" e "Acesso + Britagem primária + pilha pulmão (2)" e entre "Acesso + Britagem primária + pilha pulmão (1)" e "Britagem secundária (2)". Dessa maneira, levando em consideração o item 1, Cava 1 seria alocada no local 1, conclui-se que "Acesso + Britagem primária + pilha pulmão (1)" e "Acesso + Britagem primária + pilha pulmão (2)" devem ser alocadas em locais adjacentes e mais próximos, sendo estes 6 ou 11. Isso implica que Britagem secundária (2)" seria provavelmente alocada nos locais 7, 10 ou 11.

5.2.DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados esperados apresentados na seção 5.1., observa-se que as instalações com custos de alocação e instalação muito elevados e com maior peso para o processo tiveram seus locais selecionados com prioridade.

As instalações que têm atividades diretamente ligadas requerem uma menor distância entre si com o objetivo de economia de tempo e custo; e a modelagem do método GQAP, através das diversas iterações sensivelmente atende a esta especificação e aloca tais instalações no mesmo "site" ou sites mais próximos.

Em adição, instalações com custos de alocação e instalação muito elevados e com maior peso para o processo tiveram seus locais selecionados com prioridade.

6. CONCLUSÕES

Através dos resultados levantados e discutidos na seção 5.1 e 5.2, respectivamente, é possível prever que a utilização do método GQAP para alocação de instalações atende às necessidades e problemas de otimização de processos em um empreendimento mineiro, aumentando a eficiência da operação e diminuindo os custos de operação.

Assim é possível elencar as principais vantagens da aplicação dos métodos de otimização existentes para o problema de *layout* de mina (plano diretor).

- Menores custos com combustível, pois otimizam-se as distâncias percorridas pelos caminhões e outros equipamentos.
- Menores custos com manutenção dos equipamentos, uma vez que a se a distância percorrida por eles é menor, os gastos de pneus, motores seriam reduzidos. Esse aspecto aumentaria, portanto, a disponibilidade dos equipamentos, contribuindo positivamente para a produtividade e eventual diminuição da frota.
- Maior segurança, já que otimizando a alocação das instalações, a exposição a acidentes torna-se menor.
- Evita-se replanejamento das instalações na mina a longo prazo, evitando futuramente eventuais interrupções na operação e, portanto, perda de produção.

Conclui-se que os métodos de otimização utilizados na mineração podem ser eficientemente aplicados para otimização do plano diretor (*layout* de mina) e deve ser incentivada a maior atenção desse setor da indústria uma vez que as vantagens são grandes.

O planejamento e estudo da localização das instalações previamente à instalação e início das atividades é essencial, o que a longo prazo trará benefícios ao empreendimento como um todo. É importante ressaltar a importância da análise detalhada e profunda dos pesos das instalações e das distâncias, bem como os custos específicos, como parte do levantamento de campo para aplicações práticas (caso da seção 5). Se não realizado, a aplicação da metodologia fica limitada e os resultados não satisfatórios.

Por fim, existe uma dificuldade de utilização desse tipo de algoritmo devido principalmente à quantidade de soluções que podem ser apresentadas, porém esse tipo de algoritmo tem também a enorme vantagem de ser aberto, e portanto passível de utilização, com rotinas que podem ser acessadas pelo usuário. Assim, recomenda-se continuidade a aprofundamento da pesquisa e para tal acesso e domínio do algoritmo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araujo, T. M.U. de; Cabral, L.dos A. F. e Nascimento, R. Q. do., *Hibridizando a metaheurística C-GRASP com o método de busca por padrões adaptativos para a resolução de problemas de otimização global contínua*. UFPB, PB, Brasil, 2008.

Bueno, A. F. e Oliveira, M. C., *Pesquisa Operacional para decisão em contabilidade e administração*, Capítulo 8, *Goal Programing (Programação Multiobjetivo)*, p. 394–438. Editora Atlas, São Paulo, 2004

Bregalda, P. F.; Oliveira, A. A. F. e Bornstein, C. T., *Introdução à Programação Linear*. Editora Campus, Rio de Janeiro, 3a edição, 1988

Costa, F. P. da., *Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto*, Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas, Departamento de Engenharia de minas, Programa de pós graduação em engenharia mineral, 2005.

Feo, T.A. e Resende, M.G.C. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, 8:67-71, 1989

Feo, T.A. e Resende, M.G.C. Greedy randomized adaptative search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6:109-133, 1995

Loesch, C. e Hein, N., *Pesquisa Operacional: Fundamentos e Modelos*. Editora FURB, Blumenau, 1999.

Martinhago, A.Z., *Otimização para a locação de pátios de estocagem para exploração de impacto reduzido na Amazônia brasileira* - Lavras: UFLA, 2012.

Resende, M.G.C. e Silva, R.M. de A. GRASP: Procedimentos de Busca Gulosos, Aleatórios Adaptativos., Lopes et al. (EDS), *Metaheurísticas em Pesquisas Operacionais*, 2013.

Romero, C., A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research*, v. 153, p. 675–686, 2004.

APÊNDICE A– Relatório da visita técnica

Relatório de suporte à realização do Trabalho de Formatura

Aluna: Aimée Biondo Verdini

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

Objetivo

A visita técnica realizada bem como o relatório que se apresenta, têm como objetivo o suporte e demonstração de resultados para conclusão do Trabalho de Formatura cujo intuito é estudar o problema de layout de mina, ou seja, localização de suas instalações, e propor uma metodologia utilizando técnicas atuais de otimização.

Introdução

A visita técnica foi realizada na Sociedade Extrativa Dolomia Ltda., no dia 21 de Outubro, sob supervisão e apoio do Engenheiro Álvaro Rezende.

A SOCIEDADE EXTRATIVA DOLOMIA LTDA., foi fundada em 1935, em Taubaté-SP, quando foi iniciada a extração manual de rochas, com uma produção de cerca de 400 toneladas anuais de calcário.

Em 1950, o beneficiamento mineral estava limitado à moagem de blocos individualizados de rocha de calcário dolomítico, a partir de instalações localizadas na cidade de Taubaté. Em 1966, as instalações de beneficiamento, que incluíam britagem, moagem e armazenamento, passaram a fazer parte da estrutura produtiva montada junto à área de lavra.

Desde então, o empreendimento consolidou-se como de extração de calcário dolomítico para uso agrícola e industrial, tendo ali as instalações de beneficiamento, armazenamento e expedição do produto final, a granel, ensacado, big bag e silos.

Estudo realizado

O estudo realizado durante a Visita técnica descrita foi a verificação do número de instalações presentes no empreendimento, bem como suas áreas, localizações e distâncias entre si.

As figuras 1, 2 e 3 abaixo ilustram a visão aérea do empreendimento com suas respectivas instalações, enumeradas de 1 a 20 na tabela 1 que se segue.



Figura 1. Vista geral do empreendimento em planta



Figura 2. Vista em planta região do beneficiamento



Figura 3. Vista isométrica Dolomia

Tabela 1. Instalações do empreendimento e suas áreas

Legenda	Instalação	Área (m²)
1	Cava 1 hoje 10	153,000.00
2	Cava 1 após avanço	250,000.00
3	Cava 2 hoje 10	40,000.00
4	Cava 2 após avanço	250,000.00
5	Acesso + Britagem primária+ pilha pulmão 1 5	3,200.00
6	Acesso + Britagem primária+ pilha pulmão 2	3,600.00
7	Acesso+ Britagem secundária (1) + 3 pilhas	4,100.00
8	Britagem secundária (2)	1,100.00
9	Britagem secundária (3)	1,900.00
10	Britagem terciária	2,600.00
11	Manutenção 2	2,900.00
12	Galpão de estoque de equipamento	810.00
13	Pátio oficina	2,250.00
14	Prédio administrativo (1)	400.00
15	Balanças	120.00
16	Prédio administrativo (2)	160.00
17	Portaria	240.00
18	Estacionamento carretas principal 1	3,200.00
19	Depósito de Estéril	50.00
20	Depósito de Estéril Futuro	65.00

A área total do empreendimento para alocação das instalações descritas é de 604 mil m² considerando as cavas e suas áreas de expansão; e 67,7 mil m² se considerada apenas a área que contém as instalações.

A seguir são ilustradas as principais instalações listadas acima.



Figura 4. Britagem primária



Figura 5. Vista isométrica das instalações (britagens primária e secundária)



Figura 6. Britagem primária



Figura 7. Cava 1

Com o intuito de se estudar a melhor localização das instalações no empreendimento, faz-se necessária análise das distâncias entre as instalações, bem como a importância dessa distância para execução do processo do empreendimento. A tabela 2 abaixo mostra as instalações com suas respectivas distâncias e o peso desta distância, sendo de 1 a 5, em ordem crescente de relevância.

Tabela 2. Distância entre as instalações e seus pesos

Instalação 1	Instalação 2	Distância (m)	Peso
Cava 1	Britagem Primária 1	600	5
Cava 1	Britagem Secundária 2	860	5
Britagem Primária 1	Britagem secundária 2	75	5
Britagem Primária 2	Britagem Secundária 2	35	5
Britagem Secundária 2	Britagem terciária	22	5
Fábrica	Manutenção	110	2
Fábrica	Prédio administrativo	190	1
Prédio administrativo	Portaria	240	3
Estacionamento caminhões	Silos	415	4

Conclusão

Uma vez coletados tais dados, será possível, através de técnicas computacionais de otimização, definir o melhor layout da mina em questão e concluir, portanto o estudo de caso para realização do Trabalho de Formatura de tema "Desafios para otimização do Plano Diretor na mineração".

Além de servir de base para o estudo de caso, tal apreciação pode servir como análise para o futuro desta operação, considerando restrições e prioridades atuais e futuras da mina.

AÊNDICE B– Matriz simétrica dos fluxos entre as instalações.

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	5	5	3	3	3	1	2	1
2	1	0	4	4	3	3	3	1	2	1
3	5	4	0	1	4	5	5	3	4	2
4	5	4	1	0	4	5	4	3	2	1
5	3	3	4	4	0	3	3	4	2	1
6	3	3	5	5	3	0	3	5	2	1
7	3	3	5	4	3	3	0	4	2	1
8	1	1	3	3	4	5	4	0	3	4
9	2	2	4	2	2	2	2	3	0	1
10	1	1	2	1	1	1	1	4	1	0

APÊNDICE C- Matriz simétrica de distância entre os locais.

h/k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	526	586	474	374	181	225	258	338	373	191	222	230	269	234	261	282	296
2	526	0	315	253	180	275	208	179	121	73	278	242	196	128	253	291	314	365
3	586	315	0	107	220	383	345	325	340	332	485	440	430	402	486	527	562	671
4	474	253	107	0	113	275	240	218	233	237	384	346	330	300	387	425	465	506
5	374	180	220	113	0	163	258	205	232	223	262	218	211	180	264	295	337	373
6	181	275	383	275	163	0	43	82	127	175	107	96	117	156	186	216	256	296
7	225	208	345	240	258	43	0	33	80	126	120	96	101	145	162	190	231	277
8	258	179	325	218	205	82	33	0	48	93	142	97	85	110	164	202	237	284
9	338	121	340	233	232	127	80	48	0	52	160	130	90	60	151	198	234	270
10	373	73	223	237	223	175	126	93	52	0	236	190	138	162	206	253	271	320
11	191	278	485	384	262	107	120	142	160	236	0	35	100	140	105	97	130	161
12	222	242	440	346	218	96	96	97	130	190	35	0	38	105	58	89	128	168
13	230	196	430	33	211	117	101	85	90	138	100	38	0	53	63	116	133	197
14	269	128	402	300	180	156	145	110	60	162	140	105	53	0	115	140	174	226
15	234	253	486	387	264	186	162	164	151	206	105	58	63	115	0	41	70	118
16	261	291	527	425	295	216	190	202	198	253	97	89	116	140	41	0	39	77
17	282	314	562	465	337	256	231	237	234	271	130	128	133	174	70	39	0	41
18	296	365	671	506	373	296	277	284	270	320	161	168	197	226	118	77	41	0

