



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**GUILHERME LUÍS MELLO RIBEIRO**

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM  
ALOCÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES EM MINAS A CÉU ABERTO**

**Bagé  
2014**

**GUILHERME LUÍS MELLO RIBEIRO**

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM  
ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES EM MINAS A CÉU ABERTO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres.

**Bagé - RS  
2014**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais)

R484o Ribeiro, Guilherme Luís Mello

Otimização do planejamento operacional de lavra  
com alocação dinâmica de caminhões em minas a céu  
aberto / Guilherme Luís Mello Ribeiro.

105 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO, 2014.

"Orientação: Marcelo Xavier Guterres".

1. Alocação dinâmica de caminhões. 2. Programação  
linear multiobjetivo. 3. Pesquisa operacional. 4.  
Modelagem matemática. 5. Mineração a céu aberto. I.  
Título.

**GUILHERME LUÍS MELLO RIBEIRO**

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM  
ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES EM MINAS A CÉU ABERTO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres.

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em:

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres  
Orientador  
Unipampa

---

Prof. Me. Maurício Nunes Macedo de Carvalho  
Unipampa

---

Profª. Me. Andressa Rocha Lhamby  
Unipampa

Dedico este trabalho a minha amada esposa Cristina, pelo amor, carinho, dedicação e, principalmente, pelo incentivo, essenciais em todos os momentos e, particularmente, no alcance deste objetivo.

“Somente a superioridade moral determina as diferentes condições e confere a verdadeira supremacia”.

Allan Kardec

## RESUMO

O presente trabalho, apresenta a adaptação de um modelo matemático usado para otimizar o planejamento operacional de lavra em uma mina de carvão a céu aberto. Na situação real a alocação dos equipamentos de carga é feita de forma empírica, alicerçada na experiência do responsável pelas operações no momento. Esta situação, além de gerar constantes filas, provoca a baixa utilização dos caminhões. No modelo adaptado, a alocação dos mesmos é feita de forma dinâmica, com base em parâmetros pré-estabelecidos. O modelo aloca às frentes de lavra os equipamentos de carga e transporte, de forma a manter um fluxo de minério ou ritmo de lavra contínuo, além de maximizar a taxa de utilização dos caminhões. Para solução deste caso foi utilizada uma modelagem fundamentada em programação linear multiobjetivo, pois o problema apresenta mais de uma meta e além disso, estas apresentam conflito entre si. Inicialmente, optou-se por trabalhar com uma situação real apresentada na mina, para tornar possível o estabelecimento do efeito comparativo com a realidade, o que verificou-se, pois houve incremento substancial da taxa de utilização dos equipamentos de transporte, aliado à manutenção de um ritmo de lavra contínuo. Com base nestes conhecimentos, iniciou-se a proposição de quatro cenários, prevendo eventos, como incremento nos níveis de produção, incremento viável dos tempos de ciclo dos veículos (frentes mais distantes) e variação da capacidade da frota de veículos. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência do sistema proposto, pois os objetivos foram atingidos, possibilitando a obtenção de ganhos consistentes, se a implementação for concretizada na atividade a que se propõe.

Palavras-chave: Alocação dinâmica de caminhões. Programação linear multiobjetivo. Pesquisa operacional.

## ABSTRACT

This paper presents the adaptation of a mathematical model used to optimize the operating mine planning in a coal open pit mine. In real situation, the allocation of load equipment is empirically, based on the experience of the operations manager at the time. This situation, in addition to generating constant queues, causes low utilization of trucks. In the adapted model, the allocation of the same is dynamically, based on pre-established parameters. The model allocates the fronts of mining equipment and cargo transport, in order to maintain a flow rate of ore or continuous mining and maximize the utilization of trucks. To solve this problem a model based on multiobjective linear programming used, since the problem has more than one target and they have conflicting. Initially, we chose to work with a real situation presented in the mine, to make possible the establishment of the comparative effect with reality, because there was a substantial increase in the utilization rate of transport facilities, coupled with maintaining a pace of continuous mining. Based on this knowledge, began to propose four scenarios, predicting events, such as increased levels of production, feasible increase in times of vehicles (more distant fronts) and capacity variation of the vehicle fleet cycle. The results demonstrated the efficiency of the proposed system because the objectives were achieved, allowing to achieve consistent gains, if the implementation is realized in the activity it proposes.

Keywords: Dynamic allocation of trucks. Multiobjective linear programming. Operational research.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe do problema .....	17
Figura 2 – Mineração de superfície .....	21
Figura 3 – Produção de ROM por estado produtor .....	22
Figura 4 – Linhas ou unidades de britagem .....	23
Figura 5 – Detalhamento de uma usina termelétrica a carvão .....	24
Figura 6 – Alocação dinâmica de recursos .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre frentes de lavra, tempo de ciclo dos caminhões, produtividade das carregadeiras e ritmo de lavra em cada frente.....	51
Tabela 2 – Capacidade de carga dos caminhões .....	52
Tabela 3 – Compatibilidade entre os caminhões e carregadeiras.....	52
Tabela 4 – Compatibilidade entre as frentes de lavra e as carregadeiras.....	53
Tabela 5 – Meta de produtividade .....	53
Tabela 6 – Penalidade por desvios de produção .....	53
Tabela 7 – Ritmo de lavra por frente .....	55
Tabela 8 – Avaliação da solução inicial.....	55
Tabela 9 – Relação entre frentes de lavra, tempo de ciclo dos caminhões, produtividade das carregadeiras e ritmo de lavra em cada frente.....	56
Tabela 10 – Ritmo de lavra por frente .....	56
Tabela 11 – Avaliação da solução do primeiro cenário .....	56
Tabela 12 – Capacidade de carga dos caminhões .....	57
Tabela 13 – Ritmo de lavra por frente .....	57
Tabela 14 – Avaliação da solução do segundo cenário .....	57
Tabela 15 – Meta de produtividade .....	58
Tabela 16 – Ritmo de lavra por frente .....	58
Tabela 17 – Avaliação da solução do terceiro cenário .....	59
Tabela 18 – Capacidade de carga dos caminhões .....	59
Tabela 19 – Ritmo de lavra por frente .....	60
Tabela 20 – Avaliação da solução do quarto cenário .....	60

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 Justificativa e escolha do tema</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3 Organização do trabalho</b> .....	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 Mineração de carvão no Brasil</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.1 Mineração subterrânea</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2 Mineração de superfície</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.3 Beneficiamento do carvão</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.4 Mineração de carvão termelétrico no Brasil</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2 Pesquisa operacional</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3 Programação linear</b> .....	<b>27</b>
<b>2.4 Programação linear por metas ou multiobjetivo</b> .....	<b>28</b>
<b>2.5 Modelos de pesquisa operacional aplicados à mineração</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5.1 Alocação dinâmica de caminhões</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5.1.1 O modelo de White et al. (1982)</b> .....	<b>32</b>
<b>2.5.1.2 O modelo de White &amp; Olson (1986)</b> .....	<b>33</b>
<b>2.5.1.3 O modelo de Pinto e Merschmann (2001)</b> .....	<b>35</b>
<b>2.5.1.4 O modelo de Araújo (2008)</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5.2 Problemas de mistura de minérios</b> .....	<b>41</b>
<b>2.5.2.1 O modelo de Wilke e Reimer (1977)</b> .....	<b>41</b>
<b>2.5.2.2 O modelo de Chanda &amp; Dagdelen (1995)</b> .....	<b>42</b>
<b>2.5.2.3 O modelo de Pinto et al. (2003)</b> .....	<b>43</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1 Delimitação do problema</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2 Avaliação dos modelos</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3 Identificação do modelo</b> .....	<b>46</b>
<b>3.3 Implementação computacional</b> .....	<b>47</b>

3.4 Coleta de dados.....	47
3.5 Parâmetros atribuídos .....	47
4 DESENVOLVIMENTO .....	48
4.1 Adaptação do modelo de Araújo (2008) .....	48
4.2 Dados de entrada .....	51
4.3 Parametrização .....	53
4.4 Aspectos importantes sobre o modelo adaptado .....	54
4.5 Implementação do modelo adptado .....	54
4.6 O programa de otimização <i>Lingo</i> ® 14.0 .....	54
5 RESULTADOS E ANÁLISE.....	55
5.1 Primeiro cenário .....	55
5.2 Segundo cenário .....	57
5.3 Terceiro cenário .....	58
5.4 Quarto cenário.....	59
6 CONCLUSÃO .....	61
REFERÊNCIAS.....	64
ANEXOS .....	68

## 1 INTRODUÇÃO

Desde épocas remotas, conforme informa o Departamento Nacional de Produção Mineral (2012), o homem vem exercendo atividades de mineração, retirando de locais apropriados a argila, para artefatos de cerâmica, as rochas duras para a confecção de armas e objetos de corte, bem como ocre mineral para a elaboração de pigmentos usados em pinturas e inscrições rupestres.

Modernamente, ainda de acordo com a mesma referência, a atividade de mineração caracteriza-se pelo custo elevado e pela complexidade. Essa atividade tem início com a localização de jazidas minerais, o que normalmente é feito através de estudos geológicos regionais, seguidos por mapeamentos geológicos para detalhamento das áreas selecionadas.

Em se tratando de mineração de carvão e Brasil, a trajetória deste minério, usado principalmente para a atividade termelétrica, é caracterizada por processos cíclicos. Sua extração começou há aproximadamente 140 anos, através de pequenas unidades produtivas, na região sul do país, onde estão inseridas as maiores reservas (FERNANDES, 2011).

Especificamente no caso do Rio Grande do Sul e segundo a Companhia Riograndense de Mineração (2012), este possui reservas na ordem de mais de 3 bilhões de toneladas. Nesse caso, a mineração basicamente destina-se ao abastecimento de usinas de geração térmica de energia elétrica, sendo o eficiente planejamento de lavra de grande impacto nos custos operacionais da atividade.

Nesse sentido, numa mina de carvão ou de outro mineral a céu aberto, as atividades voltadas ao planejamento operacional de lavra, principalmente em minas de pequeno e médio porte, ainda são feitas com base em decisões e experiências anteriores (PINTO, 2007).

Portanto, a alocação de equipamentos ocorre de forma estática, ou seja, um grupo de caminhões é alocado a uma respectiva frente de lavra, onde este é carregado por uma escavadeira e se mantém nessa frente até o final da extração. Tal situação, de acordo com Costa (2005), Pinto (2007) e Araújo (2008) por não utilizar de uma metodologia ou critério técnico acarreta em grandes perdas, principalmente por efetuar o planejamento de lavra e a alocação de recursos de forma manual.

Esse critério de planejamento revela-se pouco eficiente, devido ao grande número de interações a testar, frente ao escasso tempo disponível. Além disso,

observam-se baixas taxas de utilização de equipamentos de carga e transporte, incremento dos tempos em filas e queda de produtividade (AMARAL, 2008).

Esses fatos são agravados sobretudo em períodos de estiagem, quando se tornam necessários incrementos na produção de minério devido à necessidade de aumento dos níveis de geração de energia de fonte térmica para suprir as demandas, sempre crescentes em situações de déficit hídrico (FERNANDES, 2011).

Desta forma e estrategicamente, o estado do Rio Grande do Sul por meio da Companhia Riograndense de Mineração, é detentor de um grande potencial energético sob a forma de reservas de carvão mineral no local de origem. São cerca de três bilhões de toneladas distribuídas em fase de pesquisa e áreas com titulação de lavra já consignada pelo órgão regulador federal. A empresa conta atualmente com quatro minas, Leão I, Leão II, Candiota e Jazida do Iruí (RIBEIRO et al., 2010).

O presente estudo foi realizado na Mina de Candiota, localizada no município de mesmo nome, distante quatrocentos quilômetros de Porto Alegre. A referida mina está inserida na maior jazida de carvão mineral do Brasil, onde as reservas passíveis de mineração são da ordem de um bilhão de toneladas. Além disso, a empresa é fornecedora da Usina Termelétrica Presidente Médici, localizada na mesma cidade, a qual possui capacidade instalada de 796 MW, consumindo em torno de 3. 300.000 toneladas de carvão mineral anualmente (CRM, 2014).

Assim sendo, estudos que viabilizem incrementos de produtividade podem gerar grandes impactos nas atividades de mineração, muitas vezes sem necessidade de grandes investimentos, como nos trabalhos de Ribeiro et al. (2009) e Ribeiro et al. (2010), onde uma reorganização com base em metodologia científica prevê grandes e positivas evoluções.

Com essa finalidade, White et al. (1982) iniciaram pesquisas para desenvolvimento de modelos matemáticos alicerçados em técnicas de pesquisa operacional, como programação linear, programação linear por metas (*goal programming*), programação dinâmica e algoritmos heurísticos, com a finalidade de planejar a mina no curto prazo.

Esse planejamento pode ser, ainda segundo os mesmos autores, desdobrado em objetivos como a determinação do ritmo ótimo de lavra a ser implementado em cada frente, fornecendo à usina de beneficiamento a alimentação adequada; a manutenção da mistura ajustada às características de qualidade exigidas; a determinação do exato número de caminhões alocados em cada frente de lavra; a

redução dos tempos em filas de espera para carregamento; a maximização da taxa de utilização dos equipamentos e o incremento nos níveis de produtividade.

Posto isto, este trabalho revisou modelos para planejamento operacional de lavra embasados em conceitos de pesquisa operacional, de forma que seja identificado o modelo que melhor se adapte às atividades de mineração em uma mina de carvão a céu aberto localizada na cidade de Candiota, RS.

Por meio da identificação do modelo ideal e das adaptações necessárias à realidade da mina em questão, será proposta a utilização deste como forma de otimização do planejamento operacional de lavra no curto prazo, fundamentada na política de produtividade.

A política de produtividade visa basicamente o incremento da taxa de utilização dos equipamentos, resultado da redução do tempo em filas dos caminhões, pois os mesmos são despachados para as frentes de lavra que resultarão em menores filas, ou seja, para as frentes em que eles perderão menos tempo (ARAÚJO, 2008).

A outra política existente, apoiada na qualidade, não será considerada neste trabalho, basicamente devido ao fato de que a mina em questão é bastante homogênea, o que não justifica a adoção de processos de mistura de minérios ou blendagem na situação descrita.

Além da identificação do modelo ideal e das adaptações necessárias para sua utilização, este será implementado computacionalmente, de forma que no final do trabalho seja possível a simulação para efeito comparativo entre a situação atual da mina e os possíveis ganhos advindos da utilização do estudo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Propor uma solução viável para o planejamento operacional de lavra no curto prazo com alocação dinâmica de caminhões, baseada em um modelo de programação linear por metas ou multiobjetivo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- (i) Avaliar modelos de pesquisa operacional voltados à otimização das atividades de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto;
- (ii) Identificar o modelo que melhor se ajuste à realidade da mina em questão e adaptá-lo a esta situação;
- (iii) Implementar o modelo computacionalmente, avaliando os resultados, comparando com a situação inicial e propondo a utilização do mesmo com alternativa para o incremento da produtividade;

### 1.2 Justificativa e escolha do tema

Em unidades de mineração a céu aberto, existem duas possibilidades para alocação dos caminhões às frentes de lavra. A primeira e mais simples, vista principalmente em pequenas e médias unidades mineiras, é conhecida como alocação estática.

Nesse caso, os caminhões são alocados apenas a uma frente de lavra e nela permanecem até o final da atividade.

Essa metodologia se revela pouco eficiente, consequência do planejamento de lavra e a alocação de recursos serem feitos de forma manual, pois são várias interações a testar e o tempo disponível escasso.

Em consequência disso, a alocação estática é caracterizada pelo aumento dos tempos de fila dos caminhões aguardando para serem carregados, o que acarreta em perdas de produtividade devido à baixa utilização dos mesmos. Tal situação pode ser vista na Figura 1, exemplificando os efeitos da alocação estática usada na mina estudada.



Figura 1 – Detalhe do problema



Fonte: Companhia Riograndense de Mineração (2012)

A segunda e mais eficiente possibilidade, vista em minas de maiores proporções, é conhecida como alocação dinâmica de caminhões. Nesse caso, um modelo delimita para qual frente de lavra um caminhão deve seguir após descarregar, possibilitando incrementos de produtividade e utilização dos equipamentos. Esses ganhos são justificados pela redução de tempos em filas e, por consequência, redução dos custos operacionais.

### **1.3 Organização do trabalho**

Esse trabalho apresenta-se dividido em seis capítulos. O Capítulo 1 trata da introdução, dos objetivos (gerais e específicos) e justificativa de escolha do tema.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, ponderando sobre assuntos como a mineração de carvão no Brasil, pesquisa operacional, programação linear, programação linear por metas e modelos de pesquisa operacional aplicados à mineração.

No Capítulo 3, trata-se da proposta metodológica, discorrendo sobre a delimitação do problema, avaliação dos modelos, escolha e adaptações atinentes ao mesmo, coleta dos dados e atribuição dos parâmetros.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do estudo, onde surgem detalhes como a adaptação do modelo e os dados de entrada utilizados, sua implementação, parametrização e aspectos importantes a respeito.

No Capítulo 5, é feita a análise dos resultados encontrados na situação inicial e nas simulações efetuadas.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta a conclusão do estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Mineração de carvão no Brasil

Segundo a Associação Brasileira do Carvão Mineral (2012), este é um combustível fóssil natural extraído da terra através do processo de mineração. É encontrado em grandes profundidades ou próximo da superfície, possuindo aparência preta ou marrom, lisa, macia e quebradiça. Sua procedência vem de depósitos de restos de plantas e árvores, ou seja, uma vegetação pré-histórica que se acumulou em pântanos sob uma lâmina d'água há milhões de anos.

Os depósitos, com o passar do tempo, foram cobertos por argilas e areias, ocorrendo um soterramento gradual, que provocou aumento de temperatura e pressão sobre a matéria orgânica depositada, o que veio expulsar o oxigênio e o hidrogênio, concentrando o carbono (DNPM, 2012).

Existem, ainda segundo a mesma fonte, quatro estágios na formação do carvão mineral: turfa, linhito, carvão (hulha) e antracito, os quais dependem de fatores como pressão e temperatura para sua formação.

No Brasil, segundo a ABCM (2012), a história do carvão se inicia há cerca de 210 milhões de anos, na época em que a crosta terrestre ainda estava convulsionada por terremotos, vulcões, furacões, vendavais e maremotos. Estes fenômenos provocaram violentos cisalhamentos e fizeram as montanhas e os limites costeiros separarem-se, como no caso da separação entre os continentes Americano e Africano pelo Oceano Atlântico.

Naquelas épocas geológicas, árvores gigantes e toda sorte de vegetação crescia, formando grandes e espessas florestas, favorecidas pela atmosfera muito rica em  $CO_2$ , permitindo a intensificação da função clorofiliana e o crescimento dos vegetais em um clima particularmente quente e úmido. O carvão é, então, a parte celulósica da vegetação transformada pelo tempo, pressão, bactérias e outros agentes anaeróbicos, em uma massa carbonosa (WCA, 2012).

Ainda segundo a ABCM (2012), a ocorrência do carvão no Brasil encontra-se principalmente nos estados do Rio Grande do Sul (28 bilhões de toneladas), Santa Catarina (3,3 bilhões de toneladas) e Paraná (104 milhões de toneladas).

Nesse sentido, o processo de extração de carvão é realizado tanto de forma subterrânea (*urderground mining*), quanto de forma aberta, ou mineração a céu aberto

(*surface mining*). A definição do tipo de lavra depende das características da mina em questão (TOFFOLO, 2009).

### **2.1.1 Mineração subterrânea**

A lavra subterrânea ou *underground mining*, de acordo com WCA (2012) pode ser feita por meio de galerias de forma manual, semi-mecanizada ou mecanizada, havendo dois métodos principais de mineração subterrânea: câmaras e pilares e *longwall*.

O método de câmaras e pilares consiste em deixar para trás pilares de carvão com a finalidade de suportar o teto da mina. A extração é realizada até o teto cair, então a mina é abandonada.

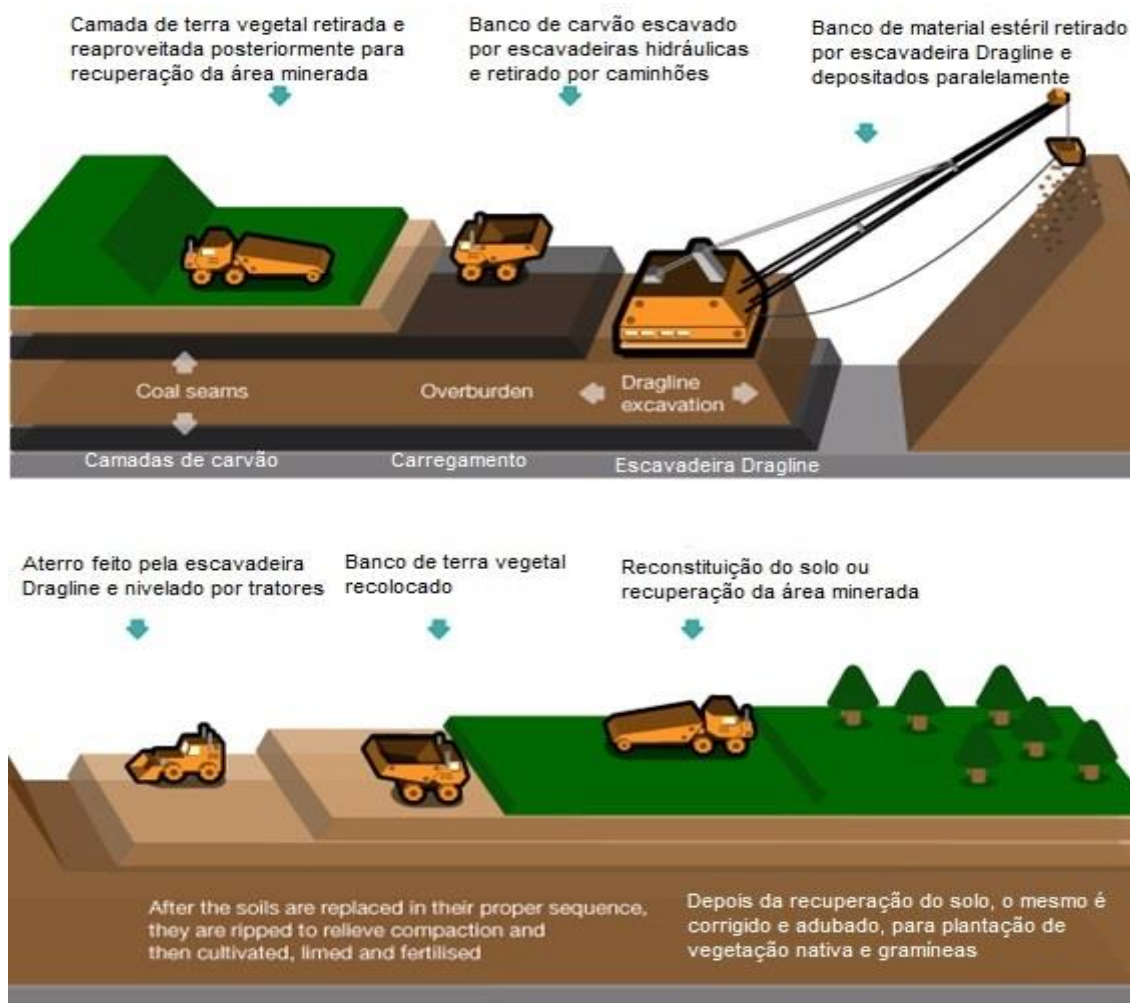
Com relação à mineração de *longwall* envolve a completa extração de uma camada de carvão usando métodos mecânicos ou semi-mecânicos.

### **2.1.2 Mineração de superfície**

Na lavra a céu aberto ou *surface mining*, a camada de carvão aflora a superfície, sendo necessária, primeiramente, a remoção da camada de estéril para possibilitar a remoção da camada de carvão. Esse método recupera uma proporção mais alta da jazida de carvão do que a mineração subterrânea, devido ao fato de que todas as camadas são exploradas e quase todo o carvão pode ser recuperado (WCA, 2012).

Na Figura 2 podem ser vistas as etapas que fazem parte da cadeia de extração de carvão mineral, desde a retirada da terra vegetal, materiais estéreis e os bancos de carvão propriamente ditos.

Figura 2 - Mineração de superfície



Fonte: Adaptado de *World Coal Association* (2012)

Pela Figura 2, verificam-se questões importantes relativas à mineração de superfície, como a recuperação necessária do solo impactado pela atividade e um segundo aspecto que diz respeito à extração do banco de material estéril utilizando uma escavadeira do tipo Dragline. Esse tipo de escavadeira movimenta grandes quantidades de material diariamente, devido ao seu grande porte e facilidade de deslocamento.

Escavadeiras deste porte são usualmente conhecidas como dragas e comumente relacionadas como coração da mina onde desempenham suas atividades, exigindo alto grau de padronização e treinamento na operação e manutenção (CRM, 2014).

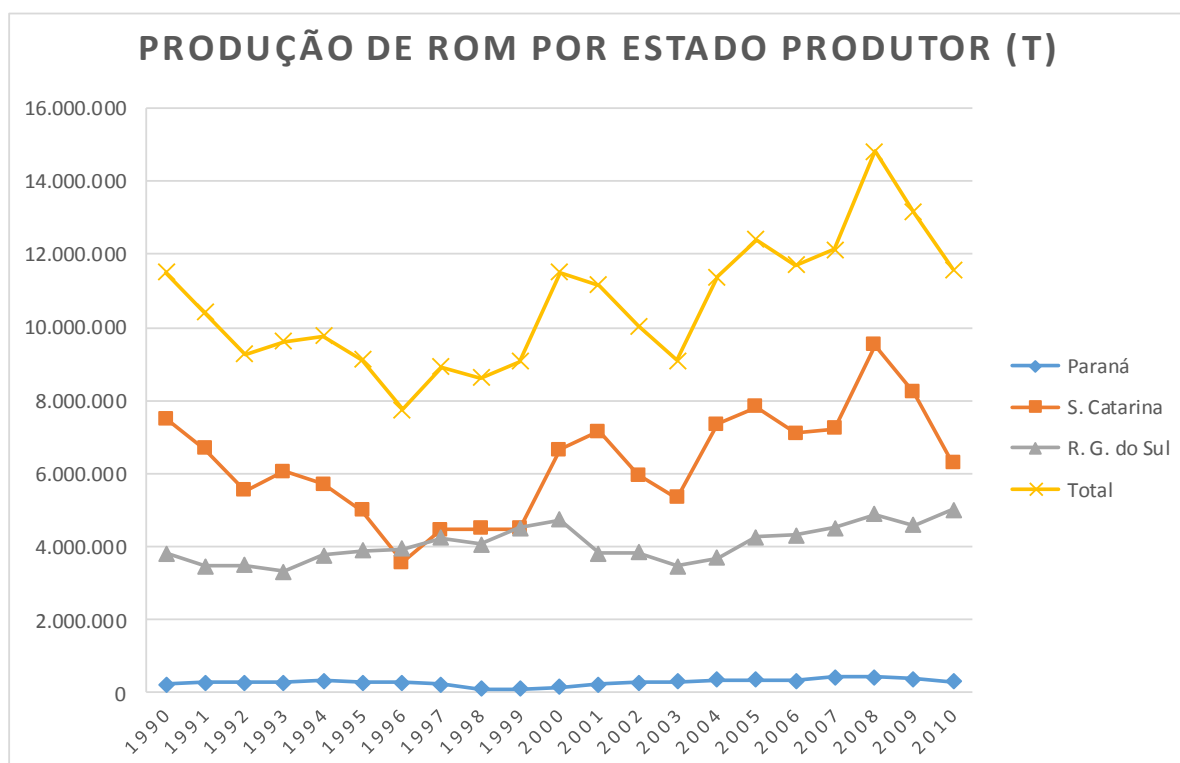
### 2.1.3 Beneficiamento do carvão

A ABCM (2012) define que o beneficiamento deste minério consiste em uma série de processos que visam à redução da matéria inorgânica, tais como rocha (estéril) e impurezas, existentes no minério a fim de melhorar sua qualidade.

O carvão bruto, obtido diretamente da mina, é denominado *run of mine* (ROM). O beneficiamento do carvão ou lavagem se refere ao tratamento dado ao carvão ROM, logo após a sua extração, objetivando assegurar a qualidade do mesmo e aumentar sua potencialidade para o uso.

O tratamento depende das propriedades do carvão e de seu uso pretendido, podendo exigir uma simples lavagem/moagem ou necessitar de processos mais complexos de tratamento. Na Figura 3, é mostrado um comparativo de produção de carvão *run of mine* (ROM) dos estados que integram a região sul do Brasil e o total produzido pela região no período compreendido entre os anos de 1990 e 2010.

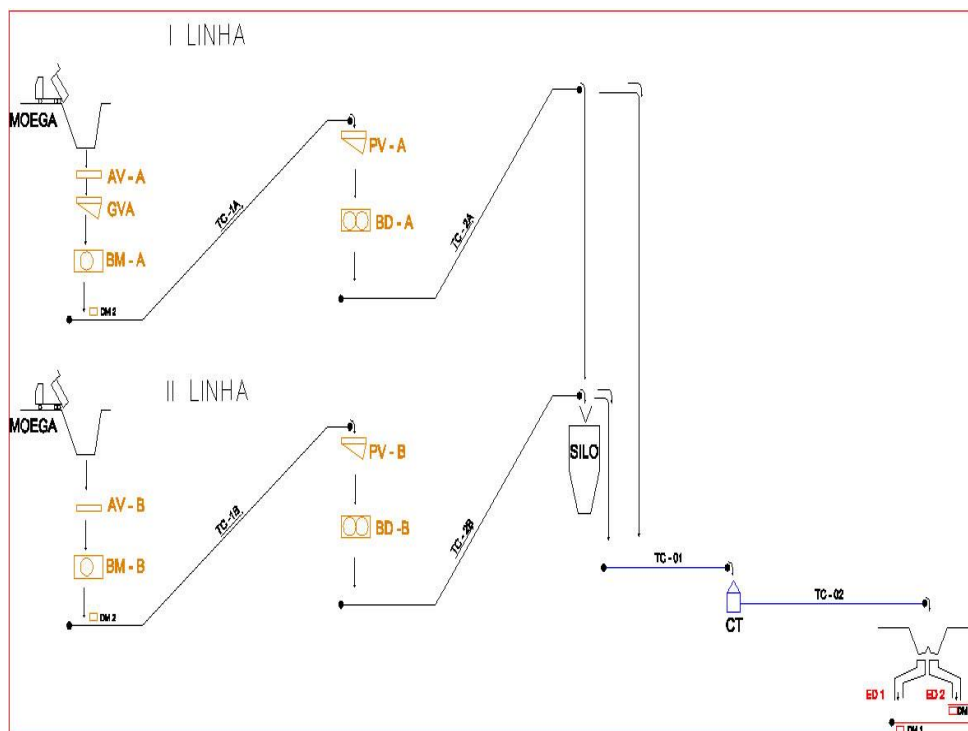
Figura 3: Produção de ROM por estado produtor (t)



Fonte: ABCM (2012)

Na Figura 4, mostra-se um diagrama de britagem constituído por duas linhas de produção, ambas compostas pelos seguintes equipamentos: alimentadores vibratórios (AV), grelha vibratória (GV), peneiras vibratórias (PV), britadores de mandíbulas (BM), britadores de duplo rolo (BD) e transportadores de correia (TC).

Figura 4 - Linhas ou unidades de britagem



Fonte: Companhia Riograndense de Mineração (2012)

Esses equipamentos tem a finalidade de efetuar a redução da granulometria do minério, o que é indispensável para a queima como combustível termelétrico (RIBEIRO et al., 2010).

#### 2.1.4 Mineração de carvão termelétrico no Brasil

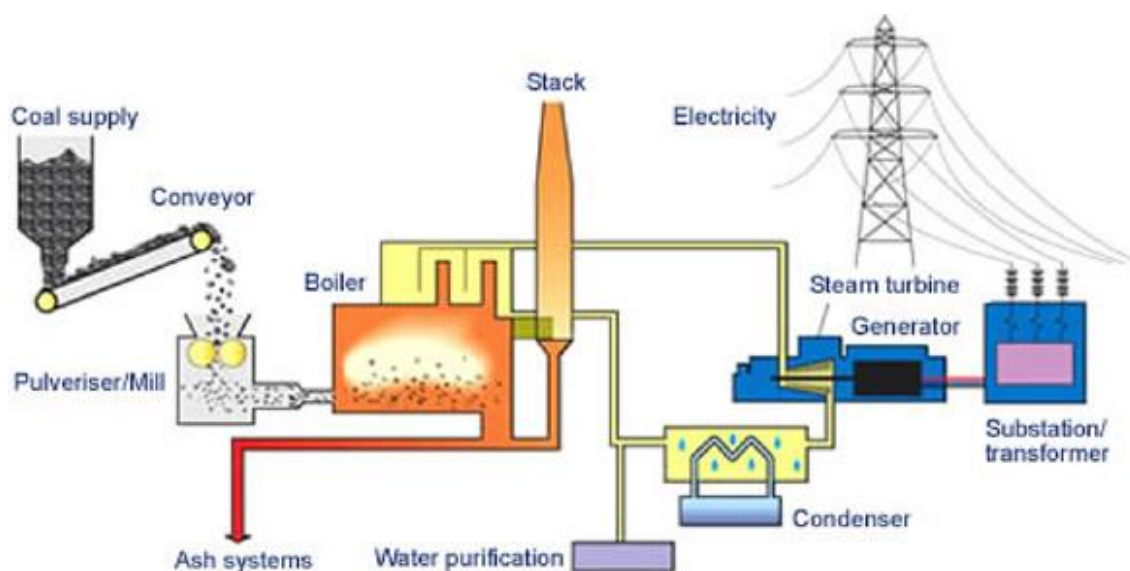
Atualmente, conforme a *World Coal Association* (2012), o principal uso da combustão direta do carvão situa-se na geração de eletricidade, por meio de usinas termelétricas. Essa tecnologia está bem desenvolvida e é economicamente competitiva.

Como pode ser visto na Figura 5, o suprimento de carvão alimenta moinhos que o reduzem ao material “pulverizado”, o qual é queimado nas caldeiras, produzindo



o vapor sob alta pressão necessário para movimentação das turbinas, responsáveis pela geração de energia, a qual é transmitida para os consumidores através de linhas de transmissão.

Figura 5 - Detalhamento de uma usina termelétrica a carvão



Fonte: *World Coal Association* (2012)

Pela Figura 5, verifica-se generalidades da geração de energia elétrica por meio da queima do carvão mineral na forma pulverizada, após seu processamento em plantas de britagem e moagem.

## 2.2 Pesquisa operacional

De acordo com Arenales et al. (2007), uma definição de pesquisa operacional foi proposta na primeira página do periódico inglês *Operational Research Quarterly* em 1967 que, de forma resumida, consiste no desenvolvimento de métodos científicos de sistemas complexos, com a finalidade de prever e comparar estratégias ou decisões alternativas. O objetivo é dar suporte à definição de políticas e determinação de ações de forma científica.

Para alguns autores, pesquisa operacional significa abordagem científica para tomada de decisões, que procura determinar como melhor projetar e operar um sistema, usualmente sob condições que requerem a alocação de recursos escassos.



A sociedade europeia EURO, ainda de acordo com Arenales et al. (2007), define pesquisa operacional como uma abordagem científica para a solução de problemas no gerenciamento de sistemas complexos. De forma sucinta, podemos dizer que pesquisa operacional é um enfoque científico sobre a tomada de decisões.

A denominação pesquisa operacional é comumente motivo de críticas e reflexões, pois pode ser definida de várias formas segundo Colin (2007), e não revela a abrangência da área e pode dar a falsa impressão de estar limitada à análise de operações.

Alguns autores sugerem outras denominações preferíveis, por exemplo, análise de decisões, mas o termo pesquisa operacional é bastante difundido no âmbito das engenharias (em particular, da Engenharia de Produção), ciências de administração, ciências de computação, economia, estatística e matemática, entre outros (CORRAR & THEÓPHILO, 2008).

Mais recentemente e de acordo com os mesmos autores, a pesquisa operacional também tem sido chamada de ciência e tecnologia de decisão. O componente científico está relacionado a ideias e processos para articular e modelar problemas de decisão, determinando os objetivos do tomador de decisão e as restrições sob as quais se deve operar. Também está relacionado a métodos matemáticos para otimizar sistemas numéricos que resultam quando se usam dados nos modelos.

O componente tecnológico está relacionado a ferramentas de *software* e *hardware* para coletar e comunicar dados, e organizá-los, usando-os para gerar e otimizar modelos e reportar resultados (ARENALES *et al.*, 2007).

De acordo com Colin (2007), a Pesquisa Operacional, advinda da Segunda Guerra Mundial, surgiu da necessidade de solução de problemas de ordem logística, tática e estratégica. Na época foram criados grupos multidisciplinares de matemáticos, físicos, engenheiros e cientistas sociais, com a finalidade de apoiar os comandos operacionais na resolução de tais problemas.

Assim, os cientistas aplicaram o método científico, que conheciam muito bem, na resolução dos problemas que lhes eram propostos, desenvolvendo, então, a ideia de criar modelos matemáticos, apoiados em dados e fatos, permitindo-lhes perceber os problemas em estudo, simular e avaliar o resultado hipotético de estratégias ou decisões diferentes (ARENALES, 2007).

Os resultados colhidos com tais estudos apresentaram tanto sucesso e credibilidade, que mesmo após o término do conflito, esses grupos de cientistas e sua nova sistemática se transferiram para empresas que, devido ao grande crescimento econômico verificado, se depararam com problemas de decisão de grande complexidade (CORRAR E THEÓPHILO, 2008).

Devido à característica multidisciplinar da PO, sua aplicação voltada aos processos de mineração surgiu entre as décadas de 50 e 60, apresentando, desde então, um crescimento considerado tímido, se comparado com outras atividades. Situação esta, também verificada em termos nacionais, onde as decisões tomadas têm base muito mais em experiências anteriores do que em real embasamento técnico, o que representa uma grande perda, se compararmos aos infindáveis benefícios que técnicas de PO poderiam representar, se fossem amplamente utilizadas (MORAES, 2005).

Especificamente no que diz respeito às atividades de mineração e de acordo com os estudos de Amaral (2008), particularmente em minas a céu aberto, os sistemas compostos pelos caminhões fora de estrada e carregadeiras (*truck shovel*), são alocados às várias frentes de extração de minério ou, simplesmente, frentes de lavra.

Nesse sentido, questões como o planejamento operacional de lavra, metodologia de aplicação do maquinário e características qualitativas do minério necessárias, podem ser modeladas através de técnicas de PO.

Dentre essas técnicas podemos citar a programação linear, a programação linear por metas (*goal programming*), modelos heurísticos e outros (ARAÚJO, 2008).

No que tange aos processos de mineração, os grandes problemas a serem resolvidos dizem respeito ao planejamento da produção, particularmente questões como alocação dinâmica de caminhões às frentes de lavra, a maximização da taxa de utilização dos mesmos e a garantia dos padrões ótimos de produtividade (COSTA, 2005).

### 2.3 Programação linear

De acordo com Corrar e Theóphilo (2008), o soviético Kolgomorov desenvolveu conceitualmente a programação linear após a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de resolver problemas de logística militares. Sua primeira aplicação foi feita em 1945, por Stigler em um problema referente à composição de uma mistura.

Em 1947, ocorreu o grande marco evolutivo dos estudos de PL, quando o jovem matemático Dantzig desenvolveu a metodologia que denominou de “método simplex”. Dantzig era matemático da força aérea e, em contato com questões relacionadas à logística, percebeu que problemas que envolviam limitação de recursos, podiam ser resolvidos por meio de uma sistemática de busca de solução ótima entre um conjunto de possíveis soluções.

O rápido avanço dos computadores fez com que a PL passasse a ser utilizada como ferramenta de gestão empresarial. Tanto que o russo Kantorovich ganhou o Prêmio Nobel em Economia pelo desenvolvimento de conceitos de planejamento ótimo.

Mais recentemente, em 1984, Karmakar desenvolveu um algoritmo que tem se mostrado superior ao simplex para a resolução de problemas extremamente grandes. Contudo, o método simplex continua sendo o mais utilizado nos dias de hoje, inclusive como base lógica das planilhas eletrônicas (CORRAR & THEÓPHILO, 2008).

Embora muitos dos problemas do mundo de negócios tenham um comportamento de não-linearidade, é certo afirmar que muitos deles podem ser tratados com emprego da programação linear, com razoável nível de aproximação (COLIN, 2007).

De acordo com Rodrigues (2006), um modelo de programação linear reduz um sistema real a um conjunto de equações ou expressões matemáticas, onde cada decisão a ser tomada é associada a uma variável de decisão. A função objetivo, ou seja, uma função numérica que representa as variáveis de decisão, expressa a medida procurada, podendo ser do tipo maximizar ou minimizar. As limitações de recursos, exigências ou condições, são expressas por meio de equações e inequações, em restrição aos valores das variáveis.

## 2.4 Programação linear por metas ou multiobjetivo

Segundo Araújo (2008), a programação linear por metas (*Goal Programming*) é um método utilizado para solução de problemas de otimização multiobjetivo, estabelecendo, *a priori*, um conjunto de valores ou metas aceitáveis para cada função objetivo, para encontrar uma solução de compromisso entre objetivos conflitantes.

Considerando-se o problema de otimização linear multiobjetivo a seguir, pode-se detalhar (como forma de simplificação, foram considerados apenas três objetivos), as Equações 1 a 5:

$$\text{Max } f_1(x) = c^T x \quad (1)$$

$$\text{Min } f_2(x) = d^T x \quad (2)$$

$$\text{Min } f_3(x) = e^T x \quad (3)$$

$$Ax = b \quad (4)$$

$$x \geq 0; \quad (5)$$

Assim, buscam-se soluções viáveis que façam com que o valor de  $f_1(x)$  seja o maior possível e  $f_2(x)$  e  $f_3(x)$  sejam pequenos. Admite-se que o decisor obtenha satisfação com qualquer solução que atenda:

$f_1(x) \geq \sigma_1$ , sendo  $\sigma_1$  o valor mínimo para  $f_1(x)$  que se deseja maximizar;

$f_2(x) \leq \sigma_2$ , sendo  $\sigma_2$  o valor máximo para  $f_2(x)$  que se deseja minimizar;

$f_3(x) = \sigma_3$ , sendo  $\sigma_3$  o valor ideal para  $f_3(x)$ ;

Nas relações acima,  $\sigma_i$  são chamadas metas, sendo as desigualdades e a igualdade definidas pelo decisor, proporcionando que o problema de otimização linear seja reformulado, como um problema de busca de uma solução factível para o seguinte sistema (Equações de 6 a 10):

$$f_1(x) \geq \sigma_1; \quad (6)$$

$$f_2(x) \leq \sigma_2; \quad (7)$$

$$f_3(x) = \sigma_3; \quad (8)$$

$$Ax = b \quad (9)$$

$$x \geq 0 \quad (10)$$

Entretanto, o problema pode ser sem solução, indicando que o decisor deve abrir mão de uma ou mais metas. Admite-se que as restrições originais do problema  $Ax = b, x \geq 0$ , gerem possíveis soluções, senão o problema multiobjetivo não tem qualquer solução. Para formalizar essa flexibilização das restrições-meta, são introduzidas novas variáveis nas restrições-meta (Equações de 11 a 13):

$$f_1(x) + y_1 \geq \sigma_1 \quad (11)$$

$$f_2(x) - y_2 \leq \sigma_2; \quad (12)$$

$$f_3(x) + y_3^+ - y_3^- = \sigma_3; \quad (13)$$

Sendo que  $y_1 \geq 0, y_2 \geq 0, y_3^+ \geq 0, y_3^- \geq 0$ . Essas variáveis são chamadas variáveis de desvio porque representam os desvios acima ou abaixo dos valores das metas. Por exemplo, se uma solução possível  $x$  é tal que  $f_1(x) < \sigma_1$ , então, com  $y_1 = \sigma_1 - f_1(x) > 0$ , a restrição-meta flexibilizada é satisfeita.

Para a utilização da programação linear por metas são utilizados dois modelos: i) método dos pesos e ii) método hierárquico, sendo que ambos baseiam-se na estratégia de converter múltiplos objetivos em apenas um. O método dos pesos considera que as soluções de interesse do decisor são aquelas em que as variáveis de desvio ou flexibilização assumem valores o mais próximos possível de zero, devendo o seguinte problema ser resolvido (Equações de 14 a 19):

$$\text{Min } \varphi(x, y) = w_1 y_1 + w_2 y_2 + w_3 (y_3^+ + y_3^-) \quad (14)$$

$$f_1(x) + y_1 \geq \sigma_1 \quad (15)$$

$$f_2(x) + y_2 \leq \sigma_2 \quad (16)$$

$$f_3(x) + y_3^+ - y_3^- = \sigma_3 \quad (17)$$

$$Ax = b \quad (18)$$

$$x \geq 0, y_1 \geq 0, y_2 \geq 0, y_3^+ \geq 0, y_3^- \geq 0 \quad (19)$$

Na modelagem,  $w_1 + w_2 + w_3$  são os pesos positivos das metas, respectivamente, representando a importância entre elas e o decisor. Exemplificando, se  $w_i = 1, i = 1, 2, 3$ ; então todas as metas têm a mesma importância para o decisor, ou se  $w_1 > w_2 > w_3$ ; então a meta 1 é mais importante que a meta 2, e esta é mais importante que a meta 3.

Com relação ao método hierárquico, os objetivos são tomados em ordem de prioridade, um após o outro. Exemplificando, suponhamos que o objetivo 1 é o mais importante para o decisor, o objetivo 2 é o segundo mais importante, o objetivo 3 é o terceiro mais importante, e assim por diante. Assim, inicialmente, minimiza-se o desvio  $y_1$  do primeiro objetivo. Após, minimiza-se o desvio  $y_2$  do segundo objetivo, sujeito à condição de que o desvio do primeiro objetivo seja mínimo, ou seja, o valor de  $y_1$  é fixado no valor mínimo obtido anteriormente. Posteriormente, minimiza-se o desvio  $y_3$  do terceiro objetivo, sujeito à condição de que os desvios do primeiro e do segundo objetivos sejam mínimos, ou seja, os valores de  $y_1$  e  $y_2$  são fixados nos valores mínimos já obtidos anteriormente e assim por diante.

Desta forma, os métodos de programação de metas procuram uma solução que satisfaça as metas do problema, sem preocupação com a otimização propriamente dita deste, ou seja, se houverem várias soluções que satisfaçam todas as metas, essa metodologia não determina a melhor delas em termos de otimização dos objetivos originais do problema,  $f_1, f_2, f_3$ . Tal situação pode ser contornada adicionando-se às funções objetivos dos modelos de programação por metas, múltiplos positivos e pequenos dos objetivos originais a serem minimizados, ou subtraindo-se múltiplos positivos e pequenos, se originalmente desejava-se maximizar. Exemplificando, no método dos pesos, é conveniente considerar (Equação 20):

$$\text{Min } \varphi(x, y) = w_1 y_1 + w_2 y_2 + w_3 (y_3^+ + y_3^-) - \varepsilon_1 f_1(x) + \varepsilon_2 f_2(x) + \varepsilon_3 f_3(x) \quad (20)$$

A programação por metas, também pode ser aplicada a problemas de otimização discreta e otimização não-linear. No caso de otimização linear, o método Simplex pode ser especializado para resolver os modelos de programação de metas.

## **2.5 Modelos de pesquisa operacional aplicados à mineração**

Nessa seção serão estudados modelos de pesquisa operacional relacionados com a alocação dinâmica de caminhões, sendo eles: White et al. (1982), White e Olson (1986), Pinto e Merschmann (2001) e Araújo (2008). Além de modelos voltados com maior especificidade à mistura de minérios: Wilke e Reimer (1977), Chanda & Dagdelen (1995) e Pinto et al. (2003).

### **2.5.1 Alocação dinâmica de caminhões**

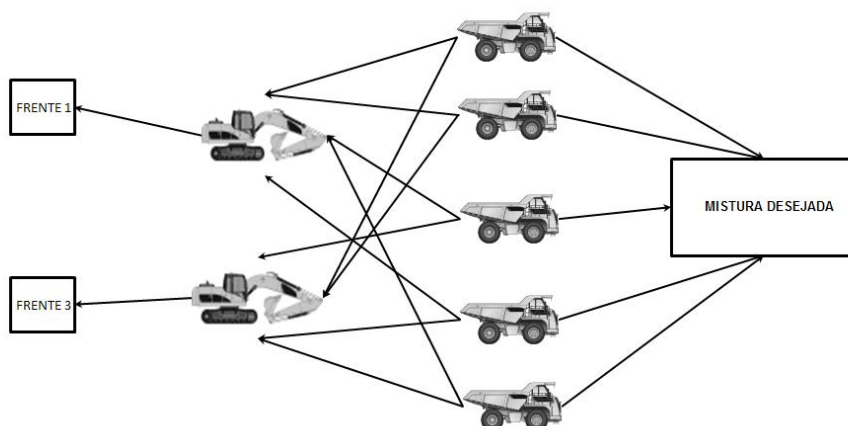
No sistema de alocação dinâmica, segundo Araújo (2008), os caminhões não ficam fixos a uma determinada frente de lavra. Ao contrário do que ocorre no modelo de alocação estática, os caminhões podem ser direcionados a diferentes frentes de lavra compatíveis, o que aumenta a produtividade da frota e, proporciona incrementos de capacidade de produção da mina ou a redução do número de equipamentos necessários para manter um determinado nível de produção.

Costa (2005), menciona outra vantagem dos modelos de alocação dinâmica, no que diz respeito à prevenção da formação de filas nos pontos de carregamento, o que reduz e aumenta as taxas de utilização dos equipamentos.

Entretanto, Araújo (2008) elenca uma desvantagem do modelo, no que diz respeito à necessidade de maiores números de operações e, de um sistema de despacho computadorizado, de forma a garantir que o sistema busque o uso de toda a sua eficiência.

A Figura 6, exemplifica um modelo de alocação dinâmica de recursos nas atividades do planejamento de lavra no curto prazo.

Figura 6 - Alocação dinâmica de recursos



Fonte: Elaborado pelo autor.

É necessário mencionar, que um eficiente algoritmo de alocação dinâmica de caminhões é de suma importância, devido ao fato deste integrar um sistema de despacho computadorizado, que reúne, ainda, um sistema de sequenciamento de viagens, além de um sistema de comunicação entre os equipamentos de carga e caminhões, e uma central de comandos. Além disso, para que um sistema de despacho seja completo, o sistema de monitoramento dos equipamentos deve ser preciso e confiável, de forma que as operações da mina possam ser otimizadas em tempo real SOUZA (2008).

### 2.5.1.1 O modelo de White et al. (1982)

O modelo de White et al. (1982) foi desenvolvido para operação da mina de Tyrone no Novo México (EUA), sendo uma das primeiras técnicas de modelagem matemática utilizadas na mineração, obtendo ganhos representativos como: redução de viagens sem carga devido ao mecanismo de seleção de rotas; redução dos tempos de inatividade de caminhões e carregadeiras; melhor resposta para distúrbios como avarias de equipamento e, conseqüentemente, incremento de produtividade.

Este modelo, apresenta um exemplo de programação linear que busca a minimização do número de caminhões necessários à alocação nas frentes de lavra, através de restrições relacionadas à continuidade do fluxo de material, pelos pontos de carga e basculamento, e às capacidades de produção dos pontos de carga.



No sistema desenvolvido, a situação da mina era monitorada por computador, usando dados fornecidos pelos operadores dos equipamentos de transporte por meio de painéis de controle. Cada operador enviava um pedido de nova atribuição após sua última descarga no britador, ou área de descarte de material, pressionando um botão no console do equipamento. Então, o computador, por meio do modelo, avaliava as possibilidades e, posteriormente, informava o operador de qual rota seguir, acionando um dos *LED's* correspondentes no mesmo console.

Esse modelo, assemelha-se à segunda parte da metodologia proposta por White e Olson (1986), diferindo, deste, no fato de usar uma variável de decisão para o volume de material transportado por hora em uma determinada rota, ao invés de taxa de trabalho dos caminhões por hora. Considera também, a presença de pilhas de estocagem, sendo este um diferencial da modelagem. As equações do referido modelo estão disponíveis no Anexo A – 1.

Uma questão que merece destaque e que tornava o sistema proibitivo, era o alto custo de instalação, que no ano de 1982 se mantinha em torno de um milhão de dólares, o que o direcionava para médias e grandes mineradoras e restringia seu acesso.

Como esta modelagem foi uma das primeiras a buscar soluções para o planejamento operacional de lavra, tornou-se base para estudos e adaptações posteriores.

#### **2.5.1.2 O modelo de White & Olson (1986)**

A sistemática utilizada no modelo de White e Olson (1986), desenvolve o planejamento de lavra através da resolução de dois problemas de programação linear sequenciais.

Primeiramente, é determinado o ritmo de lavra em cada frente, considerando-se os critérios de qualidade da mistura e as taxas de alimentação da usina de beneficiamento. Após, determina-se o ritmo de cada frente, procurando estabelecer o fluxo ótimo de transporte na mina.

Entretanto, como fator limitante desse modelo, os autores desconsideraram metas de produção e qualidade, sendo que a consideração das características dos equipamentos de carga e transporte disponíveis somente é feita após a definição do

ritmo de lavra ideal. Ainda, torna-se necessário mencionar que o modelo de White e Olson (1986) é base para o sistema DISPATCH®.

No referido modelo, verifica-se a discussão sobre aspectos de despachos computadorizados em minas a céu aberto, com objetivos de operação simultâneos, visando à resolução paralela dos problemas da produtividade da frota de equipamentos, da blendagem e da garantia da taxa de alimentação da planta.

Deste modo, os mesmos autores defendem que a utilização de programação linear em sistemas de despacho, torna-se mais indicada em situações em que a densidade do minério é relativamente constante e todos os caminhões têm a mesma capacidade.

Adicionalmente, o modelo descrito apoia-se em técnicas de programação linear e dinâmica, sendo desenvolvido para controlar o problema adicional da blendagem.

Com relação à programação linear, esta é utilizada para otimização do despacho e divide-se em duas partes. Primeiramente, torna-se necessária a solução do problema de otimização geral e, posteriormente, a maximização da produção. No que tange à programação dinâmica, esta envolve alocações ótimas de escavadeiras, carregadeiras e todos os caminhões que aguardam a solicitação de atribuição de uma carregadeira, em atendimento ao ótimo prévio determinado nos caminhos selecionados.

Conforme os estudos de Rodrigues (2006), os autores que desenvolveram a metodologia, argumentam que os benefícios tangíveis e intangíveis consequentes da implantação de um sistema de despacho, incluem, com relação aos benefícios tangíveis, minimização do manuseio, atendimento de várias restrições da mistura concomitantemente e incremento na confiabilidade de alimentação da planta. Com relação aos benefícios intangíveis, podem ser citados: previsão de produção, efeito comparativo entre desempenho de caminhões e equipamentos de carga de fabricantes distintos e geração de relatórios.

Ainda segundo o mesmo autor e como restrição da metodologia proposta, esta se aplica apenas a um ponto de descarga, portanto, para análise da qualidade do minério na primeira parte do modelo, considera-se apenas uma usina de beneficiamento. Para a utilização de mais de um ponto de descarga, é necessária a adaptação do modelo, com inserção de restrições adicionais, que contemplem a relação estéril/minério e a produção mínima exigida, de modo que este se torne mais realista. As equações do modelo em questão podem ser vistas no Anexo A – 2.

Os estudos de Araújo (2008) também corroboram nos aspectos negativos da metodologia em discussão, principalmente, no que tange a ignorar a natureza estocástica das operações de transporte, carregamento e descarregamento, os quais tendem a incrementar os tempos de espera devido ao aumento do número de caminhões alocados a um determinado equipamento de carga.

Ainda há uma questão essencial, segundo Souza et al. (2010), para que o sistema de despacho de caminhões seja completo e eficiente, é importante que o sistema de monitoramento dos equipamentos seja preciso e confiável, de modo que as operações da mina possam ser otimizadas em tempo real.

### **2.5.1.3 O modelo de Pinto e Merschmann (2001)**

De acordo com Costa (2005), o referido modelo aborda o problema de planejamento operacional de lavra, utilizando o sistema de alocação dinâmica de caminhões, contemplando, ainda, o problema da mistura e a alocação de equipamentos de carga, além do atendimento da relação estéril/minério mínima.

Segundo Pantuzza (2011), esse modelo sugere a possibilidade de alocação estática dos equipamentos de carga, ou seja, aloca um determinado caminhão a uma única frente após descarga.

O referido modelo contempla diversos aspectos relacionados ao planejamento operacional de lavra, no curto prazo e sua utilização simplifica substancialmente a programação de lavra. Desta forma, a técnica serviu de base para os trabalhos de Costa, Souza e Pinto (2005), quando foram modelados problemas relativos à mistura de minérios provenientes de várias frentes de lavra, levando-se em consideração metas de produção e qualidade, alocação dinâmica e estática dos equipamentos de transporte, restrições operacionais e alocação de equipamentos de carga necessários ao processo.

Sua implementação computacional, apesar de não trivial, devido ao elevado número de restrições, pode ser feita utilizando qualquer software de programação matemática.

Ainda, os autores desenvolveram um sistema de simulação que trabalha, paralelamente, ao sistema de otimização descrito, permitindo ao usuário utilizar os resultados obtidos na resolução do modelo de programação linear, como dados de entrada para a simulação.

Como principal desvantagem da metodologia, deve-se citar o fato da não linearidade do modelo, o que acarreta não garantia da presença de uma solução ótima. A respectiva modelagem encontra-se no Anexo A – 3.

Os autores destacam, que na maioria das minas brasileiras, a solução de problemas deste tipo ainda é feita pelo método de tentativa e erro, utilizando planilhas eletrônicas, não garantindo a solução otimizada e demandando tempo, muitas vezes indisponível. Tal situação corrobora para a utilização de metodologias semelhantes.

#### **2.5.1.4 O modelo de Araújo (2008)**

Araújo (2008), propôs uma adaptação ao modelo de alocação dinâmica de caminhões desenvolvido por Costa et al. (2005). A diferença entre os dois modelos, basicamente, consiste na equação referente à relação estéril/minério que, no modelo de Araújo (2008), é substituída por uma equação de meta de produção de estéril. Portanto, são criadas variáveis de desvio relativas ao não atendimento desta meta, além de restrições relativas às taxas de utilização dos veículos de transporte, bem como uma componente de avaliação do número de veículos utilizados.

Assim como o modelo de Costa et al. (2005), o planejamento da produção é feito para uma hora, sendo replicado enquanto não houver nenhuma frente de lavra esgotada e, as condições operacionais não se alterarem.

O modelo objetiva a minimização dos desvios das metas de produção, bem como das metas de qualidade. A formulação matemática do modelo pode ser vista nas Equações 21 a 44, definindo alocação dinâmica de uma frota heterogênea de caminhões e equipamentos de carga, levando-se em consideração, metas de produção e qualidade de minério.

Conseqüentemente, o problema da mistura de minérios com metas é formulado pelas Equações 22 a 33 e pela função objetivo (Equação 21). As Equações 27 e 28 dizem respeito, respectivamente, aos atendimentos das metas de produção de minério e estéril.

As demais restrições que complementam o modelo podem ser divididas em dois grupos, sendo que o primeiro diz respeito à alocação de equipamentos de carga e a faixa de produtividade, que torna viável a utilização desses equipamentos. O segundo grupo de restrições, está relacionado ao transporte de material na mina e utilização dos caminhões.

Particularmente, com relação ao primeiro grupo de restrições, a Equação 34 define que em cada frente pode ser alocado, no máximo, um único equipamento de carga, enquanto que a Equação 35 define que cada equipamento pode operar, no máximo, em uma única frente. A Equação 36 define que as variáveis  $y_{ik}$  são binárias.

As Equações 37 e 38 limitam, respectivamente, o ritmo de lavra máximo e mínimo, definido pela carregadeira alocada à frente, enquanto que a Equação 30 limita o ritmo de lavra máximo definido pelo usuário.

No segundo grupo de restrições, que está relacionado ao transporte de material da mina e a alocação dos caminhões, a Equação 39 faz com que um caminhão somente realize viagens a uma frente onde esteja alocado um equipamento de carga compatível.

A Equação 40 define que cada caminhão opere no máximo  $TxMax_l\%$  em uma hora (taxa máxima de utilização do equipamento), enquanto que a Equação 41 faz com que o ritmo de lavra de uma frente seja igual à produção realizada pelos caminhões alocados à frente de lavra.

A Equação 42, juntamente com a função objetivo, forçam com que os caminhões usados sejam penalizados, enquanto que a Equação 43 determina que o número de viagens que um caminhão faz a uma frente de lavra é um valor inteiro positivo. Finalmente, a Equação 44 indica que a variável  $usou_l$  é binária.

$$\text{Min } \sum_{j \in T} \beta_j^- d_j^- + \sum_{j \in T} \beta_j^+ d_j^+ + \alpha^- P^- + \alpha^+ P^+ + \gamma^- P e^- + \gamma^+ P e^+ + \sum_{l \in V} \omega_l usou_l \quad (21)$$

s. a.:

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j) x_i \leq 0 \quad \forall j \in T \quad (22)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_j) x_i \geq 0 \quad \forall j \in T \quad (23)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_j) x_i + d_j^- - d_j^+ = 0 \quad \forall j \in T \quad (24)$$

$$\sum_{i \in M} x_i \leq Pu \quad (25)$$

$$\sum_{i \in M} x_i \geq Pl \quad (26)$$

$$\sum_{i \in M} x_i + P^- - P^+ = Pr \quad (27)$$

$$\sum_{i \in E} x_i + Pe^- - Pe^+ = Er \quad (28)$$

$$x_i \leq Qu_i \quad \forall i \in F \quad (29)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (30)$$

$$d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \forall j \in T \quad (31)$$

$$P^+, P^- \geq 0 \quad (32)$$

$$Pe^+, Pe^- \geq 0 \quad (33)$$

$$\sum_{k \in C} y_{ik} \leq 1 \quad \forall j \in F \quad (34)$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \in M \quad (35)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in F, k \in C \quad (36)$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cu_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F \quad (37)$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cl_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall_i \in F \quad (38)$$

$$n_{il} tc_{il} - 60 \sum_{k \in C, g_{ik} \neq 0} y_{ik} \leq 0 \quad \forall_i \in F, l \in V \quad (39)$$

$$\frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \leq TxMax_l \quad \forall_l \in V \quad (40)$$

$$x_i - \sum_{l \in V} n_{il} cap_l \geq 0 \quad \forall_i \in F \quad (41)$$

$$usou_l \geq \frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \quad \forall_l \in V \quad (42)$$

$$n_{il} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall_i \in F, l \in V \quad (43)$$

$$usou_l \in \{0,1\} \quad l \in V \quad (44)$$

Dados de entrada:

- $M$  : Conjunto de frentes de minério;
- $E$  : Conjunto de frentes de estéril;
- $F$  : Conjunto de frentes formado por  $M \cup E$ ;
- $T$  : Conjunto de parâmetros de controle analisados no minério;
- $C$  : Conjunto de equipamentos de carga;
- $V$  : Conjunto de equipamentos de transporte;
- $Pr$  : Ritmo de lavra recomendado relativo ao minério ( $t/h$ );
- $Pl$  : Ritmo de lavra mínimo relativo;
- $Pu$  : Ritmo de lavra máximo relativo ao minério ( $t/h$ );
- $Er$  : Ritmo de lavra recomendado relativo ao estéril ( $t/h$ );
- $\alpha^-$  : Penalidade por desvio negativo da produção de minério;
- $\alpha^+$  : Penalidade por desvio positivo da produção de minério;
- $\gamma^-$  : Penalidade por desvio negativo da produção de estéril;

$\gamma^+$	Penalidade por desvio positivo da produção de estéril;
$t_{ij}$	Valor do parâmetro $j$ na frente $i$ (%);
$tr_j$	Valor recomendado para o parâmetro de controle $j$ na mistura (%);
$tl_j$	Valor mínimo admissível para o parâmetro de controle $j$ na mistura (%);
$tu_j$	Valor máximo admissível para o parâmetro de controle $j$ na mistura (%);
$\beta^-$	Penalidade por desvio negativo para o parâmetro de controle $j$ na mistura;
$\beta^+$	Penalidade por desvio positivo para o parâmetro de controle $j$ na mistura;
$Qu_i$	Ritmo de lavra máximo para a frente $i$ (t/h);
$Cl_k$	Produção mínima do equipamento de carga $k$ (t/h);
$Cu_k$	Produção máxima do equipamento de carga $k$ (t/h);
$cap_l$	Capacidade do caminhão $l$ (t);
$tc_{il}$	Tempo total de ciclo do caminhão $l$ na frente $i$ (min);
$\omega_l$	Peso associado à importância da utilização do caminhão $l$ ;
$TxMax_l$	Taxa máxima de utilização admitida ao caminhão $l$ ;

$$g_{lk} = \begin{cases} 1 & \text{Se o caminhão } l \text{ é compatível com o equipamento de carga } k; \\ 0 & \text{Caso contrário;} \end{cases}$$

Variáveis de decisão:

$x_i$  : Ritmo de lavra da frente  $i$  (t/h);

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{Se o equipamento de carga } k \text{ opera na frente } i; \\ 0 & \text{Caso contrário;} \end{cases}$$

$n_{il}$  : Número de viagens que um caminhão  $l$  realiza em uma hora;

$d_j^-$  : Desvio negativo do parâmetro de controle  $j$  na mistura (t/h);

$d_j^+$  : Desvio positivo do parâmetro de controle  $j$  na mistura (t/h);

$P^-$  : Desvio negativo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado (t/h);



- $P^+$  : Desvio positivo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado ( $t/h$ );
- $Pe^-$  : Desvio negativo do ritmo de lavra de estéril em relação ao recomendado ( $t/h$ );
- $Pe^+$  : Desvio positivo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado ( $t/h$ );
- $usou_l$ : Variável binária que assume valor 1 se o caminhão  $l$  é usado e 0, caso contrário;

## 2.5.2 Problemas de mistura de minérios

### 2.5.2.1 O modelo de Wilke e Reimer (1977)

A área que apresenta os melhores resultados e, portanto, maior sucesso aplicando técnicas de programação linear na indústria de mineração, é a área responsável pela solução dos problemas de blendagem. Entretanto, problemas como planejamento da produção, agendamento e roteirização também são aspectos a ser bastante explorados pela técnica, abordando critérios multiobjetivo (WILKE & REIMER, 1977).

O sistema desenvolvido, usa programação linear para planejar a escavação de subníveis em minas subterrâneas (método da auto-sustenção) de cobre e carvão. Além disso, a programação linear pode, trabalhando com blocos, como neste estudo, viabilizar decisões e incrementar a produção. Todavia, o elevado número de restrições, associadas a limitações de *hardware* e *software*, tendem a se tornar entraves técnicos para seu emprego (KHUCTA et al., 2004).

O modelo trabalha, sistematicamente, com a utilização de blocos de minério e estéril, revelando sua característica estocástica e empregando a programação linear na resolução do problema da mistura de minérios. Nesse contexto, serviu de base para outros estudos e adaptações como, por exemplo, em Gholamnejad (2008), onde são introduzidas variáveis binárias ao modelo original, de forma a garantir a qualidade pré-determinada de cada bloco de minério e estéril.

Assim, o mesmo considera a relação estéril/minério e as capacidades de produção, tendo como características principais: a maximização da extração de material; a restrição de qualidade entre um intervalo pré-definido e a limitação de

produção por frente de lavra. A modelagem de Wilke e Reimer (1977) encontra-se no Anexo A – 4.

Consequentemente, o referido modelo insere variáveis que não são vistas em outros modelos estudados, tais como: fator de transporte, que se refere ao tempo necessário para transportar uma tonelada de material de um bloco qualquer até seu destino; fator de carregamento, definido pelo tempo necessário para carregamento de uma tonelada de material de um bloco qualquer e um fator de economia, que delimita a total utilização do material proveniente de um bloco qualquer.

### **2.5.2.2 O modelo de Chanda & Dagdelen (1995)**

Segundo Coelho (2010) este modelo é baseado na programação linear por metas conhecida na literatura inglesa, segundo Moraes (2005), como *goal programming*. Visa a solução de um problema de mistura de minérios no planejamento de curto prazo em uma mina de carvão.

O objetivo principal é maximizar um critério econômico, reduzindo as somas dos desvios dos parâmetros individuais de qualidade e da tonelagem em relação aos valores desejados. As equações deste modelo são mostradas no Anexo A – 5.

O atendimento às metas de produção é extremamente importante, como também é a solução do problema da mistura, ou seja, o atendimento às metas de qualidade ou blendagem.

Quanto às metas de produção, se esta for superior à requerida, pode gerar problemas como falta de espaço adequado para armazenamento e incremento dos custos de transporte e manuseio. Já uma produção inferior à requerida, causa uma redução nas taxas de utilização dos equipamentos da mina e da usina de beneficiamento, além de possíveis multas contratuais pela não entrega do produto em prazo hábil.

De acordo com Alexandre (2010), este modelo multiobjetivo considera, além da maximização da produção, a minimização dos desvios de qualidade e de produção. Entretanto, desconsidera características como produtividade das máquinas de carga.

Nesse contexto, o mesmo autor apresenta outro ponto negativo do estudo deste modelo e que merece destaque: é que o mesmo desconsidera as restrições de sequenciamento para máquinas retomadoras. Assim, apresenta uma ideia com base

na identificação das áreas do pátio de minérios que devem ser, primeiramente, esvaziadas para reposição de material.

Nesse sentido e segundo o modelo, pilhas de minério que se encontram distantes umas das outras, não devem ser retiradas em uma única operação. Isso se deve ao fato de que as máquinas retomadoras possuem um tempo de deslocamento alto, comparado ao tempo de composição das cargas dos vagões de trens que serão carregados, que é pequeno.

Ainda de acordo com os estudos de Toffolo (2009), a solução do problema da mistura ou blendagem somente é possível através da informação precisa a respeito da composição do material a ser utilizado, informação esta, que muitas vezes é apenas aproximada.

Não obstante, a questão da blendagem conforme Pinto (2007), pode ser vista como um processo sistemático e metódico de combinação de uma variedade de matérias dentro de uma massa uniforme, principalmente em minas com alto grau de variabilidade de teor, ou seja, com pouca homogeneidade, onde a qualidade do produto é importante.

Conseqüentemente, em situações específicas nas quais os limites qualitativos dos produtos se tornam mais estritos, sejam quais forem os motivos (econômicos ou ambientais), a blendagem se torna um aspecto cada vez mais importante no planejamento da mina.

### **2.5.2.3 O modelo de Pinto et al. (2003)**

Este modelo trata de duas modelagens de otimização. A primeira delas relaciona-se, especificamente, à mistura de minérios proveniente de pilhas e a segunda, trata da determinação do ritmo de lavra das frentes e da alocação dos equipamentos.

A primeira parte do modelo trata da retirada de minério de diversas pilhas, de modo que possibilite o fornecimento de um produto que esteja de acordo com as especificações técnicas, relativas à qualidade e quantidade. Deste modo, torna-se necessário conhecer a quantidade de minério disponível em cada pilha, bem como sua composição química e granulometria, classificada neste estudo como fino, médio ou granulado.

A segunda parte do modelo trata da lavra da mina, geralmente composta de diversas frentes. Nessa fase, é preciso conhecer qual o ritmo de lavra a ser implementado em cada frente, de forma a atender as necessidades do cliente.

O modelo de mistura de minérios, objetiva a determinação de quais pilhas deverão entrar na mistura e qual a quantidade de material a ser retirada de cada uma delas.

Segundo Costa (2005), nesse modelo é apresentada uma solução para o problema da mistura onde opera apenas um equipamento de carga, o que tende a limitar a quantidade de minério a ser retirada de cada pilha, pois esta deve ser múltipla da capacidade da caçamba do equipamento de carga.

A implementação do referido modelo foi feita em software específico (*What's Best®*), facilitando sua utilização visto que, o mesmo, se assemelha à interface verificada no *Microsoft Excel®* apresentando, elevada capacidade de solução de problemas de grande porte, envolvendo programação linear e não-linear. A modelagem é mostrada no Anexo A – 6.

É necessário mencionar que, nesse caso, foi proposto um modelo mais completo que os até então existentes, pois contempla maior número de situações reais e exigindo menor número de restrições e variáveis para modelar um certo grupo de restrições.

### **3 METODOLOGIA**

Antes de qualquer descrição de proposta metodológica deste trabalho, torna-se necessário classificá-lo e delimitá-lo quanto aos critérios descritos por Gil (1991). Segundo este autor, o presente trabalho pode ser classificado quanto aos seus objetivos como exploratório-explicativo. Exploratório devido ao fato de buscar maior familiaridade com o problema de alocação dinâmica de recursos em atividades de mineração, o que envolveu, além da revisão de bibliografia na área, o estudo de experiências práticas relacionadas ao problema. Explicativo, porque visa identificar as relações de causalidade entre fatores como baixa utilização, geração de filas e a consequente perda de produtividade vinculada ao planejamento de lavra, quando este é feito de forma manual.

Com relação à forma de abordagem do problema, este trabalho possui características de pesquisa qualitativa e quantitativa, qualitativa por levar em consideração a observação do problema e experiências práticas relacionadas a este e, quantitativa por abordar modelos de pesquisa operacional aplicados ao planejamento de lavra em mineração.

Ainda segundo Gil (1991), este trabalho, do ponto de vista dos procedimentos técnicos, pode ser classificado como um estudo de caso, pois envolve um estudo aprofundado das atividades de alocação de recursos vinculada ao planejamento de lavra, permitindo a ampliação e o detalhamento do conhecimento a respeito desse assunto.

#### **3.1 Delimitação do problema**

A atividade analisada, de mineração de carvão a céu aberto na mina da Companhia Riograndense de Mineração em Candiota, consiste em três frentes de lavra distintas, devendo ser alocada a cada frente uma escavadeira compatível para efetuar o carregamento dos caminhões.

Para efetuar o transporte de minério, será considerada uma frota de onze caminhões fora de estrada com 50 toneladas de capacidade, todos compatíveis com a escavadeiras.

Para efeito de modelagem, será considerado apenas um ponto de descarga, ou seja, a entrada da unidade de britagem de minério.

O modelo deve manter o fluxo contínuo de minério, maximizando o ritmo de lavra nas três frentes, minimizando o número de caminhões utilizados e maximizando a taxa de utilização dos mesmos. Esses objetivos devem ser atingidos sem a formação de filas, verificadas no modelo de alocação empírica existente.

### **3.2 Avaliação dos modelos**

Nessa fase do estudo, foram analisados modelos de pesquisa operacional que, objetivam resolver o problema do planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões (i).

Dentre os modelos em avaliação, tornou-se necessário identificar o modelo que melhor se adapta ao caso de estudo.

Uma variável imprescindível na escolha do modelo, diz respeito à taxa de utilização dos equipamentos de transporte de minério que, na mina em questão, fica em torno de 50%, ou seja, os caminhões utilizam apenas metade de seu tempo disponível, para executar sua atividade.

Dentre outras características importantes à escolha do modelo, pesaram, ainda, a existência de restrições que avaliassem o número de veículos utilizados e a existência de facilidades de remoção de variáveis e restrições, que não se adaptassem às características da mina em questão.

### **3.3 Identificação do modelo**

A partir das características necessárias elencadas anteriormente, foi identificado, entre os modelos avaliados, o de Araújo (2008) como o que melhor se adaptaria a realidade do estudo (ii).

Essa identificação, se deve ao fato que o modelo prevê restrições que levam em conta a taxa de utilização dos caminhões, além de que, na sua função objetivo e demais restrições, demonstra facilidade de remoção das variáveis desnecessárias ao caso em questão.

Seria possível exemplificar, variáveis que dizem respeito ao material estéril, que nesse caso são dispensáveis, devido ao fato de que este material, na mina em questão, é retirado de outra forma que difere da descrita (escavadeiras e caminhões),

além de questões de mistura que serão desconsideradas, devido à homogeneidade da mina.

### **3.4 Implementação computacional**

Como o problema possui como característica o elevado número de restrições, são necessárias muitas interações para otimizar objetivos conflitantes.

Nesse sentido, tornou-se imprescindível a implementação computacional, através de um programa de otimização simples, e que permitisse o interfaceamento com o *Microsoft Excel® 2013*, de forma a facilitar o lançamento dos dados.

A principal alternativa, foi o programa de otimização *Lingo® 14.0*, por possuir os atributos necessários citados anteriormente (iii).

### **3.5 Coleta de dados**

No sentido de poder estabelecer o efeito comparativo com a situação atual da atividade de mineração, principalmente no que tange à taxa de utilização dos caminhões, que apresenta uma média de 50%, seria necessária uma coleta de dados de três frentes de extração de minério. Para tanto, serão utilizados onze caminhões iguais de 50 toneladas de capacidade e três escavadeiras diferentes.

Informações como tempo de ciclo dos caminhões em cada frente de lavra, produtividade das carregadeiras, ritmo de lavra em cada frente e as devidas compatibilidades entre frentes de lavra e carregadeiras e, destas, com os equipamentos de transporte, serão essenciais à modelagem.

### **3.6 Parâmetros atribuídos**

Na implementação do modelo, tornou-se necessário o estabelecimento de parâmetros imprescindíveis, como as penalidades por desvios de produção e a declaração da meta de produção objetivada.

Foram utilizadas as mesmas penalidades estabelecidas pelo estudo realizado por Pantuza (2011).

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Adaptação do modelo de Araújo (2008)

A adaptação do modelo de Araújo (2008) consiste, basicamente, na remoção das variáveis que se relacionam com a retirada de estéril e a mistura de minérios.

Nesse sentido, o modelo adaptado contempla apenas as variáveis que se relacionam com a extração de minério, sendo elas:

Dados de entrada:

$M$	: Conjunto de frentes de minério;
$C$	: Conjunto de equipamentos de carga;
$V$	: Conjunto de equipamentos de transporte;
$\alpha^-$	: Penalidade por desvio negativo da produção de minério;
$\alpha^+$	: Penalidade por desvio positivo da produção de minério;
$\omega_l$	: Peso associado à importância da utilização do caminhão $l$ ;
$Pr$	: Ritmo de lavra recomendado relativo ao minério ( $t/h$ );
$Pl$	: Ritmo de lavra mínimo relativo;
$Pu$	: Ritmo de lavra máximo relativo ao minério ( $t/h$ );
$Qu_i$	: Ritmo de lavra máximo para a frente $i$ ( $t/h$ );

$$g_{lk} = \begin{cases} 1 & \text{Se o caminhão } l \text{ é compatível com o equipamento de carga } k; \\ 0 & \text{Caso contrário;} \end{cases}$$

$Cl_k$	: Produção mínima do equipamento de carga $k$ ( $t/h$ );
$Cu_k$	: Produção máxima do equipamento de carga $k$ ( $t/h$ );
$tc_{il}$	: Tempo total de ciclo do caminhão $l$ na frente $i$ (min);
$TxMax_l\%$	: Taxa máxima de utilização admitida ao caminhão $l$ ;
$cap_l$	: Capacidade do caminhão $l$ ( $t$ );

Variáveis de decisão:



$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{Se o equipamento de carga } k \text{ opera na frente } i; \\ 0 & \text{Caso contrário;} \end{cases}$$

$x_i$  : Ritmo de lavra da frente  $i$  ( $t/h$ );

$P^-$  : Desvio negativo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado ( $t/h$ );

$P^+$  : Desvio positivo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado ( $t/h$ );

$n_{il}$  : Número de viagens que um caminhão  $l$  realiza em uma hora;

$usou_l$ : Variável binária que assume valor 1 se o caminhão  $l$  é usado e 0, caso contrário;

$$\text{Min } \alpha^- P^- + \alpha^+ P^+ + \sum_{l \in V} \omega_l usou_l \quad (45)$$

s.a.:

$$\sum_{i \in M} x_i \leq Pu \quad (46)$$

$$\sum_{i \in M} x_i \geq Pl \quad (47)$$

$$\sum_{i \in M} x_i + P^- - P^+ = Pr \quad (48)$$

$$x_i \leq Qu_i \quad \forall i \in F \quad (49)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad (50)$$

$$P^+, P^- \geq 0 \quad (51)$$

$$\sum_{k \in C} y_{ik} \leq 1 \quad \forall j \in F \quad (52)$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \in M \quad (53)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in F, k \in C \quad (54)$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cu_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F \quad (55)$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cl_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall_i \in F \quad (56)$$

$$n_{il} tc_{il} - 60 \sum_{k \in C, g_{ik} \neq 0} y_{ik} \leq 0 \quad \forall_i \in F, l \in V \quad (57)$$

$$\frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \leq TxMax_l \quad \forall_l \in V \quad (58)$$

$$x_i - \sum_{l \in V} n_{il} cap_l \geq 0 \quad \forall_i \in F \quad (59)$$

$$usou_l \geq \frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \quad \forall_l \in V \quad (60)$$

$$n_{il} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall_i \in F, l \in V \quad (61)$$

$$usou_l \in \{0,1\} \quad l \in V \quad (62)$$

Assim, de acordo com a adaptação efetuada no modelo de Araújo (2008), a função objetivo (Equação 45), restringe-se a minimizar os desvios relativos à produção de minério e ao ritmo de lavra. As Equações 46 e 47 delimitam que o ritmo de lavra da frente  $i$  ( $t/h$ ), não deve ultrapassar os limites máximos e mínimos referentes ao ritmo de extração de minério ( $t/h$ ). A Equação 48 diz respeito ao atendimento da meta de produção de minério, balizando o ritmo de lavra recomendado ( $t/h$ ).

Com relação à Equação 49, esta restringe que o ritmo de lavra da frente  $i$  ( $t/h$ ), não deve ultrapassar o ritmo máximo para a mesma frente  $i$  ( $t/h$ ), ou seja, limita o ritmo de lavra máximo definido pelo usuário.

Por conseguinte, as Equações 50 e 51, denotam que o ritmo de lavra da frente  $i$  ( $t/h$ ) e os desvios positivo e negativo do ritmo de lavra de minério em relação ao recomendado, devem ser maiores ou iguais a zero.

É necessário mencionar que, em cada frente, pode ser alocado, no máximo, um único equipamento de carga, o que é definido pela Equação 52 e que, cada equipamento de carga pode operar, no máximo, em uma única frente, definido pela Equação 53.

Cabe ainda salientar que, a variável constante na Equação 54 é uma variável binária, que pode assumir dois valores, 0 ou 1, assumindo 1 se o equipamento de carga  $k$  opera na frente  $i$ , ou 0 caso contrário. As Equações 55 e 56 limitam,

respectivamente, o ritmo de lavra máximo e mínimo, definido pela carregadeira alocada à frente.

Com relação à Equação 57, esta faz com que um caminhão somente realize viagens a uma frente onde esteja alocado um equipamento de carga compatível.

Por conseguinte, analisando a Equação 58, a qual define que cada caminhão opere  $TxMax_l$  em uma hora, verifica-se a delimitação da taxa de utilização máxima admitida ao caminhão  $l$ , bem como a definição de que o ritmo de lavra de cada frente, seja igual à produção realizada pelos caminhões alocados a essa frente, e feita pela Equação 59. Finalmente, a equação 60 tem o papel, juntamente com a função objetivo (Equação 45), de penalizar os caminhões usados.

Além disso, a Equação 61 garante que o número de viagens que um caminhão faz a uma frente, seja um valor inteiro positivo.

Finalmente, a variável  $usou_l$ , constante na Equação 62, tem característica binária, assumindo valor 1 se o caminhão  $l$  é usado e 0 caso contrário.

## 4.2 Dados de entrada

Nesta fase, foram utilizados os dados de entrada reais coletados das três frentes de lavra, dados essenciais à resolução do problema.

Além disso, foi fundamentada a devida compatibilidade entre as frentes de lavra e os equipamentos de carga, e destes com os equipamentos de transporte.

A Tabela 1 estabelece uma relação entre as frentes de lavra (M), os tempos de ciclo dos caminhões alocados em cada frente (TC – Equação 60), a produtividade mínima e máxima das carregadeiras (Cl e Cu – Equações 55 e 56) e o ritmo de lavra máximo (Qu – Equação 49) de cada frente de lavra.

Tabela 1 – Relação entre frentes de lavra, tempo de ciclo dos caminhões [min], produtividade das carregadeiras [t/h] e ritmo de lavra em cada frente [t/h]

M	TC	Cl	Cu	Qu
1	15,4	200	300	400
2	13,2	250	400	400
3	10	150	350	400

Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação à Tabela 2, a mesma estabelece a capacidade (Cap – Equação 59) de cada veículo de transporte (l).

Tabela 2 – Capacidade de carga dos caminhões [t]

l	Cap
1	50
2	50
3	50
4	50
5	50
6	50
7	50
8	50
9	50
10	50
11	50

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 3, estabelece a compatibilidade (Equação 39) entre os caminhões (l) e carregadeiras (k), o número 1 indica que são compatíveis.

Tabela 3 – Compatibilidade entre os caminhões e carregadeiras

l	k1	k2	k3
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	1
10	1	1	1
11	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalmente, a Tabela 4 estabelece a compatibilidade (Equação 35) entre as frentes de lavra (M) e as carregadeiras (k) alocadas às mesmas. Da mesma forma, o número 1 indica que são compatíveis.

Tabela 4 – Compatibilidade entre as frentes de lavra e as carregadeiras

k	M1	M2	M3
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 Parametrização

Nesta etapa do estudo, estabeleceu-se uma meta de produtividade geral para o conjunto de frentes de minério (Equações 37 e 38), com base na expectativa horária de consumo da usina de geração de energia (Tabela 5), além da implantação das penalidades (Equação 21) por desvios de produção (Tabela 6).

Tabela 5 – Meta de produtividade

Produção (t/h)	
Mínima	900
Meta	1000
Máxima	1100

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – Penalidade por desvios de produção

Desvios	
Peso por desvio negativo de produção	100
Peso por desvio positivo de produção	100

Fonte: Elaborado pelo autor

#### **4.4 Aspectos importantes sobre o modelo adaptado**

No modelo adaptado, da mesma forma que em Araújo (2008), o planejamento da produção é feito para uma hora, sendo replicado enquanto não houver frente exaurida e as condições operacionais forem similares.

Além disso, tornou-se indispensável a abertura das equações da modelagem, apresentada no Anexo B.

#### **4.5 Implementação do modelo adaptado**

O modelo matemático adaptado foi implementado, da mesma forma que em Araújo (2008), no *software* de otimização *Lingo® 14.0*, interfaceando-o com o *Microsoft Excel® 2013*.

Para os testes foi utilizado microcomputador com processador *Intel Core i5*, com 4 GB de RAM sob plataforma *Windows 8*.

#### **4.6 O programa de otimização *Lingo® 14.0***

O programa de otimização *Lingo®* é uma ferramenta bastante simples para realizar a otimização linear ou não linear, com a finalidade de formular e resolver problemas grandes concisamente, permitindo, ainda, a análise da solução.

Devido ao elevado número de restrições identificado no modelo aplicado, foi necessária a obtenção de uma licença educacional irrestrita, pois a licença *demo* disponível tornou-se incompatível devido às suas limitações.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISE

A Tabela 7, mostra o ritmo de lavra encontrado em cada frente. Com relação à Tabela 8, esta relaciona o número de viagens a serem efetuadas pelos veículos alocados a cada frente de lavra, além da taxa de utilização dos mesmos.

Tabela 7 – Ritmo de lavra por frente (t/h)

	X
M1	250
M2	350
M3	400

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 – Avaliação da solução inicial

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	TV
M1	2			1					2			5
M2				1			3			3		7
M3	2			2			1		2	1		8
Tx (%)	84,7			81,0			82,7		84,7	82,7		

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Tabela 7, o ritmo de lavra total se mantém na meta de 1000 t/h. Com relação à Tabela 8, verifica-se que seis caminhões deixaram de ser alocados às frentes de minério, permanecendo outros cinco em alocação. Nota-se ainda a elevada taxa de utilização dos veículos de transporte alocados, bem próxima da meta de 85%.

### 5.1 Primeiro cenário

No primeiro cenário, foram simulados eventos de incremento dos tempos de ciclo dos veículos de transporte, ou seja, frentes de lavra mais distantes do ponto de descarga, como se nota na Tabela 9, coluna TC. Além disso, os outros dados constantes nas Tabelas 2 a 6 foram mantidos. Assim, podem ser vistos os resultados da simulação deste cenário nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 9 – Relação entre frentes de lavra, tempo de ciclo dos caminhões, produtividade das carregadeiras e ritmo de lavra em cada frente

M	TC	CI	Cu	Qu
1	20,5	200	300	400
2	17,1	250	400	400
3	13,9	150	350	400

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10 – Ritmo de lavra por frente (t/h)

	X
M1	250
M2	350
M3	400

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 – Avaliação da solução do primeiro cenário

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	TV
M1				1	2							5
M2	2			1		2	2					7
M3			3			1	1	3	2			8
Tx (%)	57,0		69,5	62,7	68,3	80,2	80,2	69,5	68,3			

Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se neste cenário, que o ritmo de lavra continua dentro da meta de 1000 t/h (Tabela 10) e aumentam os veículos alocados à cada frente de lavra para oito (Tabela 11), resultado esperado, visto que os tempos de ciclo dos mesmos foram incrementados, necessitando de um número maior de veículos para cumprir a meta de produção. Além disso, verifica-se queda na taxa de utilização dos mesmos, para uma média de 69,5%. Cabe comentar ainda sobre o esforço computacional verificado neste cenário, foram necessários 569,9 segundos e 7.170.416 interações para chegar à melhor solução (vide Anexo C - 2), bem acima das outras simulações.



## 5.2 Segundo cenário

No segundo cenário, foi simulado um incremento de capacidade dos caminhões de 40%, que pode ser verificado na Tabela 12. Ainda, deve-se mencionar que os outros parâmetros constantes nas Tabelas 1, 3 e 4 a 6 foram mantidos. Nesse sentido, podem ser verificados os resultados deste cenário nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 12 – Capacidade de carga dos caminhões

I	Cap
1	70
2	70
3	70
4	70
5	70
6	70
7	70
8	70
9	70
10	70
11	70

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 – Ritmo de lavra por frente (t/h)

	X
M1	280
M2	350
M3	350

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 – Avaliação da solução do segundo cenário

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	TV
M1						1	3					4
M2	3							2				5
M3	1					3		1				5
Tx (%)	82,7					75,7	77,0	60,7				

Fonte: Elaborado pelo autor

Conclui-se neste cenário que, como visto na Tabela 13, houve uma queda do ritmo de lavra total para 980 t/h, abaixo da meta, mas dentro do limite mínimo. Com relação à Tabela 14, como esperado, foi alocado menor número de caminhões, ou seja, quatro. Ainda a taxa média de utilização da frota foi de 74%.

### 5.3 Terceiro cenário

No terceiro cenário, foi simulado um incremento de produtividade de 10%, o que pode ser verificado na tabela 15. Novamente, os parâmetros constantes nas Tabelas 1 a 4 e 6 foram mantidos. Nesse sentido, podem ser verificados os resultados deste cenário nas tabelas 16 e 17.

Tabela 15 – Meta de produtividade

Produção (t/h)	
Mínima	1000
Meta	1100
Máxima	1200

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 – Ritmo de lavra por frente (t/h)

X	
M1	300
M2	350
M3	400

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 – Avaliação da solução do terceiro cenário

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	TV
M1			3	3								6
M2	3										3	7
M3										5		8
Tx (%)	66,0		77,0	77,0						83,3	66,0	

Fonte: Elaborado pelo autor

Então, verifica-se, neste cenário, uma queda do ritmo de lavra total, abaixo da meta, mas dentro do limite mínimo (Tabela 16) e a alocação de cinco equipamentos de transporte, mantendo a taxa média de utilização da frota alocada em 73,9% (Tabela 17).

#### 5.4 Quarto cenário

Finalmente, no quarto cenário, simulou-se a redução da capacidade dos caminhões em 20%, como pode ser visto na Tabela 18. Ainda, da mesma forma que anteriormente, os parâmetros constantes nas Tabelas 1, 3 a 6 foram mantidos. Assim, os resultados deste cenário podem ser verificados na Tabela 19 e 20.

Tabela 18 – Capacidade de carga dos caminhões

I	Cap
1	40
2	40
3	40
4	40
5	40
6	40
7	40
8	40
9	40
10	40
11	40

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19 – Ritmo de lavra por frente (t/h)

	X
M1	280
M2	320
M3	400

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 20 – Avaliação da solução do quarto cenário

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	TV
M1		3	2				2					7
M2	2				3					3		8
M3	2				1		2			1	4	10
Tx (%)	77,3	77,0	51,3		82,7		84,7			82,7	66,7	

Fonte: Elaborado pelo autor

Verifica-se, neste cenário, a melhor alocação observada nas simulações, onde o ritmo total de lavra ficou dentro da meta esperada (Tabela 20) e foram alocados oito equipamentos de carga à frota, mantendo uma taxa média de utilização de 65,3% (Tabela 20). Isso demonstra que a frota ideal para a situação real, seria com caminhões de 40 toneladas de capacidade.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho tratou do problema do planejamento operacional de lavra em uma mina de carvão a céu aberto, com alocação dinâmica de equipamentos de carga e transporte. A solução visa maximizar a eficiência dos processos de mineração, seja minimizando custos, desperdícios, ou reduzindo os impactos causados pelos mesmos. Essa eficiência, principalmente nos dias atuais, é fator de competitividade e manutenção das empresas no mercado.

Nesse caso, especificamente, foi verificado que a alocação dos equipamentos na mina em questão, era feita sem caráter científico, necessitando de ajustes constantes durante a atividade, gerando filas no aguardo do carregamento e, consequentes perdas como descrito anteriormente.

Assim, foram analisados modelos matemáticos baseados em técnicas de pesquisa operacional, como programação linear por metas, com o objetivo principal de tornar mais eficaz essa alocação, tratando o problema sem o empirismo característico (i).

Então, dos modelos pesquisados, foi identificado o de Araújo (2008) como o que transmitia a melhor situação para tornar possível a adaptação para a situação real, pois seria necessário remover do mesmo as questões que levassem em conta padrões de mistura que não seriam necessários, especificamente, no caso analisado e por adicionar uma restrição relativa à taxa de utilização dos equipamentos de transporte (ii).

De forma a avaliar uma situação real, foram coletados dados de operação para confrontar com a solução do modelo, tais como: tempo de ciclo dos caminhões, capacidade de carga dos mesmos, produtividade das carregadeiras e ritmo de lavra mínimo e máximo em cada frente. Além disso, foram atribuídos parâmetros como ritmo de lavra mínimo e máximo em cada frente, meta de produção, penalidade por desvios de produção e compatibilidade entre caminhões e carregadeiras e entre frentes de lavra e carregadeiras.

Nesse sentido, passou-se à adaptação do modelo e a verificação das possibilidades de implementação. Devido ao elevado número de restrições, o programa de otimização *Lingo*® 14.0, mostrou-se como principal alternativa, visto sua capacidade de interfaceamento com o *Microsoft Excel*® 2013, o que facilitou o lançamento dos dados e verificação das soluções.

Então, a partir dos dados inseridos, foi gerada a solução inicial que mostrava a alocação de cinco caminhões de uma frota de onze e uma taxa de utilização média dos equipamentos alocados de 83%, bem superior à encontrada *in loco*. Após isso, foram estabelecidos quatro cenários, onde foram variados parâmetros ou dados de entrada possíveis, e analisado o comportamento do modelo quanto a isso.

Verificando-se os resultados das simulações, além da condição real, é possível avaliar a eficiência e coerência do modelo e da implementação, pois a alocação dos equipamentos de transporte é feita de forma muito mais coerente.

Dessa maneira, de acordo com os objetivos da técnica, realmente são minimizados os desvios de produção e o número de caminhões utilizados.

Isso acarreta uma série de benefícios, como redução de custos com equipamentos com baixa utilização (combustível e operação), redução do desgaste dos equipamentos, torna mais fácil o planejamento das atividades (manutenções preventivas, abastecimentos e intervalos programados) e permite incrementos de produtividade.

Cabe salientar, ainda, que o sistema pode ser aplicado como importante ferramenta para dimensionamento de frotas, pois como visto no quarto cenário, a frota ideal para a condição real seria de caminhões com 40 toneladas de capacidade, onde o balanceamento é muito mais coerente (iii).

Como possível obstáculo da estratégia, é possível citar o esforço computacional em algumas simulações, pois foi verificada a dificuldade do sistema em gerar soluções de qualidade em baixo tempo de processamento computacional, situação ocorrida no primeiro cenário simulado, onde foram necessários 569,9 segundos para o programa efetuar 7.170.416 interações e chegar a uma solução ótima. Isso pode causar dificuldades, devido a metodologia ser feita para um regime horário, podendo ser replicado enquanto não houver frente exaurida e as condições forem semelhantes, e soluções que ocupem mais de 500 segundos, de acordo com Araújo (2008) podem ser fator de ineficiência.

Ainda, como perspectiva para trabalhos futuros, poderiam ser analisados outros modelos matemáticos ou heurísticos. Verificou-se, durante a pesquisa, o início de ocorrência de trabalhos envolvendo lógica nebulosa (*fuzzy*), como o trabalho desenvolvido por Pinto (2007), com resultados bastante interessantes.

Além disso, um bom caminho para a continuidade dos estudos, sem dúvida, passaria por testes de outros programas de otimização, como o GAM'S, por exemplo,

que tornassem as interações mais rápidas e onde fosse possível a simulação de eventos não programados, comuns neste tipo de atividade, como parada de equipamentos por manutenção corretiva (quebra) e variações climáticas.

É imprescindível que seja mencionada a questão de que, o referido sistema, somente poderá mostrar sua eficácia total como qualquer outro, para a mesma finalidade, se houver um sistema paralelo que informe para cada equipamento de transporte, para qual frente de minério este deve se deslocar após seu último descarregamento. Sem essa informação, que advém de um monitoramento em tempo real da frota, como visto, por exemplo, no programa DISPATCH®, a geração, mesmo que de pequenas filas, pode ser inevitável.

Finalmente, é possível concluir que os objetivos do estudo em questão foram atingidos, pois a técnica mostrou-se funcional e eficiente, permitindo o confronto com uma situação real e, ainda, demonstrando ganhos em relação à mesma.

Isso demonstra que na atividade essencial de mineração, o empirismo verificado em empresas, principalmente as mais antigas, onde a cultura organizacional e, até mesmo política dificulta e, comumente, inviabiliza o surgimento de inovações, pode ser substituído por técnicas ambientadas no método científico com importantes ganhos e, todo ganho em eficiência possível, numa área amplamente conhecida e divulgada como fonte geradora de resíduos, deve ser bem vindo e amplamente incentivado, seja pela iniciativa privada, seja pelas áreas governamentais.

## REFERÊNCIAS

ABCM – Associação Brasileira do Carvão Mineral. **Carvão Mineral**. Disponível em: <<http://www.carvaomineral.com.br/abcm/>>. Acesso em 21 out. 2012, 15:00:00.

ALEXANDRE, R. F. **Modelagem, simulação da operação e otimização multiobjetivo aplicada ao problema de despacho de veículos em minas a céu aberto**. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

AMARAL, M. **Modelos matemáticos e heurísticas para o auxílio ao planejamento de operações de lavra em minas a céu aberto**. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

ARAÚJO, F. C. R. **Planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões: uma abordagem exata e heurística**. Dissertação de mestrado. Ouro Preto: UFOP, 2008.

ARENALES, M. N. et al. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

CHANDA, E. K. C. & DAGDELEN, K. **Optimal blending of mine using goal programming and interactive graphics systems**. *Internacional Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol.9, 1995.

COELHO, I. M. **Um algoritmo baseado em *grasp*, *vnd* e *iterated local search* para a otimização do planejamento operacional de lavra**. Ouro Preto: Relatório técnico-científico, 2010.

COLIN, E. C. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, *marketing* e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO – CRM. **Minas**. Disponível em: <<http://www.crm.rs.gov.br/lista/529/Minas>>. Acesso em 20 set. 2012, 08:00:00.



COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO – CRM. **Minas**. Disponível em: <[http://www.crm.rs.gov.br/conteudo/858/?Mina-de-Candiota#.U\\_kCpmPINAo](http://www.crm.rs.gov.br/conteudo/858/?Mina-de-Candiota#.U_kCpmPINAo)>. Acesso em 15 mai. 2014, 23:00:00.

CORRAR, L. J. & THEÓPHILO, C. R. **Pesquisa operacional para decisão em contabilidade e administração**. São Paulo: Atlas, 2008.

COSTA, F. P. **Aplicação de técnicas de otimização a problemas de planejamento de lavra em minas a céu aberto**. Dissertação de mestrado. Ouro Preto: UFOP, 2005.

COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F.; PINTO, L. R. **Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade**. Revista da Escola de Minas, Ufop: 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Mineração**. Disponível em: <<http://www.dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>>. Acesso em 05 nov. 2012, 14:30:15.

DISPATCH® MODULAR MINING. **Dispatchdemo**. Disponível em: <<http://mmsi.com/product/dispatch/#tab-0>>. Acesso em 22 out. 2012, 16:00:00.

FERNANDES, F. R. C. et al. **Recursos minerais & sustentabilidade territorial: grandes minas**. Rio de Janeiro: CETEM / MCTI, 2011.

GHOLAMNEJAD, J. **A zero-one integer programming model for open pit mining sequences**. Gholamnejad: Template Journal, 2008.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

KUTCHA, M.; NEWMAN, A. TOPAL, E. **Implementing a production schedule at LKAB's Kiruna Mine**. Magazine Interfaces, v. 34, n. 2, 2004.

MORAES, E. F. **Um modelo de programação matemática para otimizar a**

**composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CRVD.** Dissertação de mestrado. Ouro Preto: UFOP, 2005.

PANTUZA, G. J. **Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto.** Dissertação de mestrado. Ouro Preto: UFOP, 2011.

PINTO, E. B. & MERSCHMANN, L. H. C. **Planejamento operacional de lavra de mina usando modelos matemáticos.** Belo Horizonte: Revista Escola de Minas, 2001.

PINTO, L. R. *et al.* M. **Uso de otimizador de planilhas eletrônicas para auxílio ao planejamento de lavra.** Ouro Preto: Relatório técnico, 2003.

PINTO, E. B. **Despacho de caminhões em mineração usando lógica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes.** Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

RIBEIRO, G. L. M. *et al.* **Mapeamento do processo de descobertura de carvão mineral em uma companhia de mineração localizada na região sul do país.** Salvador: Enegep, 2009.

RIBEIRO, G. L. M. *et al.* **Aplicação da metodologia OEE para análise da produtividade do processo de descobertura de carvão mineral em uma mina a céu aberto.** São Carlos: Enegep, 2010.

RODRIGUES, L. F. **Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto.** Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

SOUZA, M. J. F. & ARAÚJO, F. C. R. **Uma heurística para o planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões.** Belo Horizonte: Revista Escola de Minas, 2011.

SOUZA, M. J. F. *et al.* **Algoritmos eficientes para resolução de problemas**

**combinatórios.** Ouro Preto: Relatório técnico-científico, 2010.

SOUZA, M. J. F. **Um modelo de alocação dinâmica de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade.** Ouro Preto: UFOP, 2008. Artigo.

TOFFOLO, T. A. M. **Otimização do fluxo de produtos de uma empresa mineradora.** Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

WHITE, J. W.; ARNOLD, M. J. CLEVINGER, J. G. **Automated open-pit truck dispatching at Tyrone.** Enginnering and Mining Journal, 1982.

WHITE, J. W. & OLSON, J. P. **Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives.** Mining Enginnering, v. 38, n. 11.

WILKE, F. L. & REIMER, T. H. **Optimazing the short term production schedule for a open pit iron ore mining operation.** 15th intenat. Appl. Comput. Oper. Res. In Mineral Indust. Brisbane, Australia: 1977.

WORL COAL ASSOCIATION. **Coal mining.** Disponível em: <<http://www.worldcoal.org/coal/coal-mining/>>. Acesso em 15 ago. 2012, 15:00:00.

## Anexo A – Modelos pesquisados

### 1 O modelo de White *et al.* (1982)

$$\text{Min} \sum_{i \in N_P} P_i T d_i + \sum_{j \in N_S} \sum_{i \in E_j} P_{ij} T b_j + C \quad (1)$$

s.a.:

$$\sum_{i \in E_j} P_{ij} - \sum_{i \in S_j} P_{ij} = 0 \quad \forall j \in N_f \quad (2)$$

$$\sum_{i \in S_j} P_{ij} - R_j = 0 \quad \forall j \in N_C \quad (3)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in N_C, \quad i \in N_P \quad (4)$$

Dados de entrada:

- $N_P$  : Conjunto de rotas viáveis;
- $N_S$  : Conjunto de pontos de basculamento;
- $N_C$  : Conjunto de pontos de carga;
- $N_f$  : Conjunto de pontos formado por  $N_S \cup N_C$ ;
- $E_j$  : Conjunto de rotas viáveis que chegam no ponto  $j$ ;
- $S_j$  : Conjunto de rotas viáveis que saem do ponto  $j$ ;
- $C$  : Número de pontos de carga;
- $T d_i$  : Tempo de deslocamento pela rota  $i$  (min.);
- $T b_j$  : Tempo de basculamento do ponto  $j$  (min.);
- $R_j$  : Taxa de carregamento do ponto  $j$  (caminhões/min.);

E a seguinte variável de decisão:

- $P_{ij}$  : Taxa de caminhões que utilizam a rota  $i$  que possui ligação com um ponto de carga ou basculamento  $j$  (caminhões/min.);

Na formulação, a função objetivo (equação 1) visa minimizar a necessidade de caminhões mantendo a produção máxima dos equipamentos de carga, conforme restrição (equação 3). A garantia de que a taxa total de entrada de caminhões em um

ponto de carga ou basculamento seja igual à taxa total de saída deste ponto é feita pela equação 2. Ainda nesse sentido, a equação 4 não permite valores negativos para a taxa de caminhões em uma rota.

## 2 O modelo de White & Olson (1986)

Segundo Costa (2005), esse modelo é dividido em duas partes, das equações 5 à 8, é apresentada a formulação para a primeira parte do modelo, referente à otimização do problema da mistura de minérios, tendo como objetivo a minimização da função de custo dada por (equação 5), a qual considera o ritmo de lavra, o atendimento às taxas de alimentação da usina de beneficiamento e de qualidade da mistura, além do remanuseio de material. Ainda as restrições do modelo estão relacionadas às capacidades de produção dos equipamentos de carga (equação 6), às taxas de alimentação mínima requerida da usina de beneficiamento (equação 7) e à qualidade da mistura (equação 8).

$$\text{Min} \sum_{i \in N_m} C_m X_i + C_p (Pu - \sum_{i \in N_F} X_i) + \sum_{i \in N_{est}} C_s X_i + \sum_{i \in N_F} \sum_{j \in S} l_j C_q t_{ij} X_i \quad (5)$$

s.a.:

$$0 \leq X_i \leq R_i \quad \forall_i \in N_F \quad (6)$$

$$Pu \geq \sum_{i \in N_F} X_i \quad (7)$$

$$tl_j \leq tc_j + \sum_{i \in N_F} (t_{ij} - tc_j) X_i \frac{T_c}{M_c} \leq tu_j \quad \forall_j \in S \quad (8)$$

Dados de entrada:

- $N_m$  : Conjunto de equipamentos de carga alocados nas frentes de lavra;
- $N_{est}$  : Conjunto de equipamentos de carga alocados nas pilhas de estoque;
- $N_F$  : Conjunto de pontos de carga formado por  $N_s \cup N_c$ ;
- $S$  : Conjunto de parâmetros de qualidade analisados no minério;

$C_m$	: Custo de movimentação de material ( $h/m^3$ );
$C_P$	: Custo associado à alimentação da usina de beneficiamento ( $h/m^3$ );
$C_S$	: Custo de estocagem de material ( $h/m^3$ );
$C_q$	: Custo associado à qualidade do minério ( $h/m^3$ );
$P_u$	: Produção máxima admissível ( $h/m^3$ );
$t_{ij}$	: Teor do parâmetro $j$ no minério proveniente da frente ou pilha de estoque $i$ (%);
$tl_j$	: Teor mínimo admissível para o parâmetro $j$ no produto final (%);
$tu_j$	: Teor máximo admissível para o parâmetro $j$ no produto final (%);
$tc_j$	: Teor corrente para o parâmetro $j$ na pilha de mistura (%);
$l_j$	: Importância do parâmetro $j$ ;
$R_i$	: Produção máxima do ponto de carga $i$ ( $m^3/min.$ );
$T_C$	: Intervalo de controle ( $h$ );
$M_C$	: Massa de controle ( $t$ );
$SG$	: Peso específico ( $t/m^3$ );

E a seguinte variável de decisão:

$P_{ij}$	: Taxa de caminhões que utilizam a rota $i$ que possui ligação com um ponto de carga ou basculamento $j$ (caminhões/min.).
----------	--

A segunda parte do modelo, segundo White e Olson (1986) apud Costa (2005), mostra semelhança com o modelo de White *et al.* (1982). A diferença baseia-se na utilização do volume de material transportado por hora como variável de decisão, e não a taxa de caminhões por hora, que utilizam uma rota. Ainda é considerada a presença de pilhas de estocagem. A segunda parte do modelo é apresentada pelas equações 9 a 14.

$$\text{Min} \sum_{i \in N_P} P_i T d_i + \sum_{j \in N_S} \sum_{i \in E_j} P_{ij} T b_j + EC_F \quad (9)$$

s.a.:

$$\sum_{i \in E_j} P_{ij} - \sum_{i \in S_j} P_{ij} = 0 \quad \forall_j \in N_D \quad (10)$$

$$\sum_{i \in S_j} P_{ij} = R_j \quad \forall_j \in N_m \quad (11)$$

$$\sum_{i \in S_j} P_{ij} \leq R_j \quad \forall_j \in N_{est} \quad (12)$$

$$\sum_{i \in S_j} P_{ij} = X_j \quad \forall_j \in N_F \quad (13)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad \forall_j \in N_D, i \in N_P \quad (14)$$

Dados de entrada:

- $N_P$  : Conjunto de rotas viáveis;
- $N_S$  : Conjunto de pontos de basculamento;
- $N_m$  : Conjunto de equipamentos de carga alocados nas frentes de lavra;
- $N_{est}$  : Conjunto de equipamentos de carga alocados nas pilhas de estoque;
- $N_F$  : Conjunto de pontos de carga formado por  $N_S \cup N_C$ ;
- $N_D$  : Conjunto de pontos de carga e basculamento formado por  $N_F \cup N_S$ ;
- $E_j$  : Conjunto de rotas viáveis que chegam no ponto  $j$ ;
- $S_j$  : Conjunto de rotas viáveis que saem do ponto  $j$ ;
- $E$  : Número de pontos de carga;
- $C_F$  : Capacidade da frota ( $m^3$ );
- $Td_i$  : Tempo de deslocamento pela rota  $i$  ( $h$ );
- $Tb_j$  : Tempo de basculamento no ponto  $j$  ( $h$ );
- $R_i$  : Taxa de carregamento de ponto  $i$  ( $m^3/h$ );

E a seguinte variável de decisão:

- $P_{ij}$  : Volume transportado pela rota  $i$  que possui ligação com um ponto de carga ou basculamento  $j$  ( $m^3/h$ ).

Na formulação, de acordo com Costa (2005), a função descrita na equação 9 objetiva minimizar a necessidade de transporte de material da mina e a restrição em (equação 10) relaciona-se com a continuidade de fluxo de material através dos pontos de carga e basculamento.

A restrição vista na equação 11, determina que o ritmo de lavra das frentes de minério deve ser igual à sua taxa de carregamento. Já a definição de que o ritmo de

lavra em pilhas de estocagem deve ser menor ou igual à taxa de carregamento do ponto, é feita através da restrição observada em (equação 12).

Ainda é necessário mencionar que a equação 13 garante a união das duas partes do modelo de White e Olson (1986), através da qual é definido que o fluxo de material que sai de um ponto de carga deve ser igual ao ritmo de lavra determinado na primeira parte do modelo.

### 3 O modelo de Pinto e Merschmann (2001)

Na formulação do modelo, é possível observar que a função objetivo (equação 15) deve ser maximizada, sujeitando-se à equação 16, que define valores mínimos e máximos admissíveis para o parâmetro de qualidade  $j$  no produto final. Além disso, há outras restrições que complementam o referido modelo, as quais relacionam-se com a alocação de equipamentos de carga.

A restrição constante na equação 17 define que cada frente possui um único equipamento de carga, enquanto a restrição constante na equação 18, define que cada equipamento de carga opera em uma única frente.

O ritmo de lavra é delimitado pela restrição constante em (equação 19), sendo o referido ritmo imposto pelos equipamentos de carga, podendo ser máximo ou mínimo. Já a relação estéril/minério é delimitada pela equação 20.

Ainda nesse sentido e através da observação das equações 16 e 21, é possível concluir sobre a não linearidade do modelo, o que acarreta na não garantia de que a solução final produzida seja realmente a solução ótima.

$$Max \sum_{i \in M} x_i \quad (15)$$

s.a.:

$$tl_j \leq \frac{\sum_{i \in M} t_{ij} x_i}{\sum_{i \in M} x_i} \leq tu_j \quad \forall_j \in S \quad (16)$$



$$\sum_{k \in C} y_{yk} \leq 1 \quad \forall_i \in F \quad (17)$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall_k \in C \quad (18)$$

$$\sum_{k \in C} Cl_k y_{ik} \leq x_i \leq \sum_{k \in C} Cu_k y_{ik} \quad \forall_i \in F \quad (19)$$

$$\sum_{i \in M} x_i \geq Pr \quad (20)$$

$$\frac{\sum_{i \in M} x_i}{\sum_{i \in M} x_i} \geq rem \quad (21)$$

Dados de entrada:

- $M$  : Conjunto de frentes de minério;
- $E$  : Conjunto de frentes de estéril;
- $F$  : Conjunto de frentes formado por  $M \cup E$ ;
- $S$  : Conjunto de parâmetros de qualidade analisados no minério;
- $C$  : Conjunto de equipamentos de carga;
- $Pr$ : Ritmo de lavra recomendado ( $t/h$ );
- $t_{ij}$ : Teor do parâmetro  $j$  na frente  $i$  (%);
- $t_{lj}$ : Teor mínimo admissível para o parâmetro  $j$  no produto final (%);
- $t_{uj}$ : Teor máximo admissível para o parâmetro  $j$  no produto final (%);
- $rem$ : Relação estéril/minério requerida;
- $Cl_k$ : Produção mínima do equipamento de carga  $k$  ( $t/h$ );
- $Cu_k$ : Produção máxima do equipamento de carga  $k$  ( $t/h$ );

$g_{lk}$ :  $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se o caminhão } l \text{ é compatível com o equipamento de carga } k; \\ 0 \text{ caso contrário;} \end{array} \right.$

$Vu_{il}$ : Produtividade do caminhão  $l$  operando na frente  $i$  ( $t/h$ );

Variáveis de decisão:

$x_i$  : Ritmo de lavra da frente  $i$  ( $t/h$ );

$y_{ik}$ :  $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se o equipamento de carga } k \text{ opera na frente } i; \\ 0 \text{ caso contrário;} \end{array} \right.$

$z_{il}$  :  $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ se o caminhão } l \text{ opera na frente } i; \\ 0 \text{ caso contrário;} \end{array} \right.$

#### 4 O modelo de Wilke e Reimer (1977)

As variáveis  $M$ ,  $E$  e  $F$  representam, respectivamente, o conjunto de blocos de minério, o conjunto de blocos de estéril e o conjunto de blocos formado por  $M \cup E$ . A variável de decisão que retorna a quantidade a ser lavrada em um bloco  $i$  é dada por  $x_i$ .

A função objetivo na equação 22 maximiza a economia  $e_i$  obtida com a utilização do material proveniente do bloco  $i$ . O parâmetro de controle  $j$  é definido pelas restrições de qualidade constantes nas equações 23 e 24, e não deve ser superior ao limite  $t_{uj}$ , nem inferior ao limite  $t_{lj}$ , visto que cada bloco  $i$  possui um teor  $t_{ij}$ .

A delimitação da produção é feita através da equação 25, onde a capacidade máxima da pilha a ser formada por período é dada por  $C_{BB}$ . Em cada bloco  $i$  não pode ser lavrado mais do que sua capacidade  $Q_{ui}$  (equação 26). As restrições constantes nas equações 27 e 28 definem, respectivamente, a quantidade mínima de estéril a ser lavrada por período, que é definida por  $W$  e a relação estéril/minério ( $rem$ ).

O fator de carregamento ( $L_i$ ) define o tempo necessário para carregamento de uma tonelada de material do bloco  $i$ , e multiplicado pela quantidade de material lavrado não deve exceder o tempo total de carga disponível dado por  $C_s$  (equação 29).

O tempo necessário para transportar uma tonelada de material do bloco  $i$  até seu destino é denominado de fator de transporte ( $T_i$ ), e multiplicado pela quantidade de material lavrado não deve exceder o tempo total de transporte disponível dado por  $C_T$  (equação 30). Ainda, a garantia de que as variáveis de decisão não assumirão valores negativos é dada pela restrição constante na equação 31.

$$Max \sum_{i \in M} e_i x_i + \sum_{i \in E} e_i x_i \quad (22)$$

s.a.:

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j) x_i \leq 0 \quad j = \text{variável de controle} \quad (23)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - t_{lj}) x_i \geq 0 \quad j = \text{variável de controle} \quad (24)$$

$$\sum_{i \in M} x_i \leq C_{BB} \quad (25)$$

$$x_i \leq Q_{ui} \quad \forall i \in F \quad (26)$$

$$\sum_{i \in E} x_i \geq W \quad (27)$$

$$\sum_{i \in E} x_i - rem \sum_{i \in M} x_i = 0 \quad (28)$$

$$\sum_{i \in F} x_i L_i \leq C_s \quad (29)$$

$$\sum_{i \in F} x_i T_i \leq C_T \quad (30)$$

$$x_i \geq 0 \quad (31)$$

## 5 O modelo de Chanda & Dagdelen (1995)

Segundo Chanda & Dagdelen (1995) apud Costa (2005), o modelo é representado pelas equações 32 a 42. Na referida formulação, dois critérios existentes necessitam de otimização e são representados pela equação 32.

O primeiro critério, ou seja, a maximização da extração do minério contido no conjunto de blocos  $M$ , onde a cada bloco  $i$  é associado um valor econômico  $e_i$  e um teor  $t_{ij}$  para o parâmetro de controle  $j$ , e a minimização da soma dos desvios de produção  $P^+$  e  $P^-$  e dos desvios de qualidade  $d_j^+$  e  $d_j^-$  para todos os parâmetros de controle  $j$ .

Para cada variável de desvio é associada uma penalidade, sendo  $\beta^-$  e  $\beta^+$  as penalidades por desvios negativos e positivos de produção, respectivamente, e  $\alpha_j^-$  e  $\alpha_j^+$  as penalidades por desvios negativos e positivos de qualidade do parâmetro de controle  $j$ .

A definição dos desvios de produção é feita através da restrição constante na equação 33, que objetiva fazer com que o total de minério extraído seja igual a um valor meta  $Pr$ ; não sendo possível alcançar este valor, são aceitos dois desvios, um positivo  $P^+$  e um negativo  $P^-$ , em relação à meta  $Pr$ .

Com relação aos desvios de qualidade positivos  $d_j^+$  e negativos  $d_j^-$ , estes são obtidos na restrição constantes na equação 34, onde o teor do parâmetro  $j$  na mistura deve apresentar um valor de grande proximidade à meta  $tr_j$ .

A capacidade de produção é limitada pelas equações 35 e 36, através dos limites de produção superior  $Pu$  e inferior  $Pl$ . A qualidade do produto final é limitada pelas equações constantes em 37 e 38, as quais limitam o teor do parâmetro  $j$  superiormente por  $t_{uj}$  e inferiormente por  $t_{lj}$ .

A quantidade de minério disponível em cada bloco é dada por  $Q_{ui}$  e não pode ser ultrapassada (equação 39).

A garantia de que as variáveis não assumam valores negativos é dada pelas restrições constantes nas equações 40, 41 e 42.

$$\text{Max} \sum_{i \in M} e_i x_i - \sum_{j \in S} \alpha_j^- d_j^- - \sum_{j \in S} \alpha_j^+ d_j^+ - \beta^- P^- - \beta^+ P^+ \quad (32)$$

s.a.:

$$\sum_{i \in M} x_i + P^- - P^+ = Pr \quad (33)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_j)x_i + d_j^- - d_j^+ = 0 \quad \forall_j \in S \quad (34)$$

$$\sum_{i \in M} x_i - Pu \leq 0 \quad (35)$$

$$\sum_{i \in M} x_i - Pl \geq 0 \quad (36)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j)x_i \leq 0 \quad \forall_j \in S \quad (37)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_j)x_i \geq 0 \quad \forall_j \in S \quad (38)$$

$$x_i \leq Qu_i \quad \forall_i \in M \quad (39)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall_i \in M \quad (40)$$

$$d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \forall_j \in S \quad (41)$$

$$P^+, P^- \geq 0 \quad (42)$$

## 6 O modelo de Pinto *et al.* (2003)

No modelo, a função objetivo (equação 43) é caracterizada por maximizar a quantidade de minério retirada de um conjunto  $M$  de pilhas, de forma a gerar um produto final no qual o valor do  $j$  – ésimo parâmetro, esteja dentro das especificações estabelecidas (equação 44).

A garantia de que a quantidade de minério retirada de uma pilha  $i$  não supere a sua quantidade disponível  $Qu_i$  é dada pela equação 45. Além disso, a equação 46 estabelece que esta quantidade seja múltipla da capacidade da caçamba  $C_c$  do equipamento de carga.

Com relação à equação 47, esta determina que o número de caçambadas a serem efetuadas em uma pilha  $i$ , deve ser um valor inteiro positivo, bem como a equação 48, que impede que valores negativos sejam aceitos para  $x_i$ .

Nesse sentido, observa-se ainda que a equação 48 não é linear, por isso este modelo pode conduzir a soluções não ótimas, ou seja, não há a garantia da otimalidade da solução final gerada. Mas, tais restrições são facilmente linearizadas, resultando nas equações equivalentes 49 e 50.

$$\text{Max} \sum_{i \in M} x_i \quad (43)$$

s.a.:

$$tl_j \leq \frac{\sum_{i \in M} t_{ij} x_i}{\sum_{i \in M} x_i} \leq tu_j \quad \forall j \in S \quad (44)$$

$$x_i \leq Q_{ui} \quad \forall i \in M \quad (45)$$

$$x_i = C_C N_i \quad \forall i \in M \quad (46)$$

$$N_i \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in M \quad (47)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in M \quad (48)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j) x_i \leq 0 \quad \forall j \in S \quad (49)$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_j) x_i \geq 0 \quad \forall j \in S \quad (50)$$

Dados de entrada:

- $M$  : Conjunto de pilhas de minério;
- $S$  : Conjunto dos parâmetros de qualidade analisados no minério;
- $t_{ij}$  : Teor do parâmetro  $j$  na pilha  $i$  (%);
- $tl_j$  : Teor admissível para o parâmetro  $j$  no produto final (%);
- $Qu_i$  : Quantidade máxima disponível na pilha  $i$  (t);
- $C_C$  : Capacidade da carregadeira (t);

Variáveis de decisão:

- $x_i$  : A quantidade de minério a ser retirada da pilha  $i$  ( $t$ );
- $N_i$  : O número de caçambadas a serem efetuadas na pilha  $i$ ;

## ANEXO B – Abertura das equações do modelo

$$\text{Min } Z = \alpha^- P^- + \alpha^+ P^+ + \omega_1 \text{usou}_1 + \omega_2 \text{usou}_2 + \omega_3 \text{usou}_3 + \omega_4 \text{usou}_4 + \omega_5 \text{usou}_5 + \omega_6 \text{usou}_6 + \omega_7 \text{usou}_7 + \omega_8 \text{usou}_8 + \omega_9 \text{usou}_9 + \omega_{10} \text{usou}_{10} + \omega_{11} \text{usou}_{11}$$

A função objetivo visa minimizar os desvios positivos e negativos do ritmo de lavra recomendado, além de dizer quais caminhões serão utilizados, através dos pesos associados à importância de sua utilização.

S.A.

$$1) x_i \leq Pu$$

$x_i$  = ritmo de lavra na frente  $i$  (t/h) {vdd}

$Pu$  = ritmo de lavra máximo (t/h) {pe}

O ritmo de lavra na frente  $i$  deve ser menor ou igual ao ritmo de lavra máximo.

$$x_1 \leq 1000 \text{ (t/h)}$$

$$x_2 \leq 1000 \text{ (t/h)}$$

$$x_3 \leq 1000 \text{ (t/h)}$$

$$2) x_i \geq Pl$$

$x_i$  = ritmo de lavra na frente  $i$  (t/h) {vdd}

$Pl$  = ritmo de lavra mínimo (t/h) {pe}

O ritmo de lavra na frente  $i$  deve ser maior ou igual ao ritmo de lavra mínimo.

$$x_1 \geq 800 \text{ (t/h)}$$

$$x_2 \geq 800 \text{ (t/h)}$$

$$x_3 \geq 800 \text{ (t/h)}$$

$$3) x_i + \alpha^- + \alpha^+ = Pr$$

O ritmo de lavra na frente  $i$ , somado às penalidades por desvios negativo e positivo da produção de minério, deve ser igual ao ritmo de lavra recomendado de minério.

$x_i$  = ritmo de lavra na frente  $i$  (t/h) {vdd}

$\alpha^-$  = penalidade por desvio negativo na produção de minério {pe}

$\alpha^+$  = penalidade por desvio positivo na produção de minério {pe}

$Pr$  = ritmo de lavra recomendado relativo ao minério (t/h) {pe}



$$x_1 + 100 + 100 = 1000$$

$$x_2 + 100 + 100 = 100$$

$$x_3 + 100 + 100 = 1000$$

$$4) x_i \leq Qu_i$$

$x_i$  = ritmo de lavra na frente  $i$  (t/h) {vdd}

$Qu_i$  = ritmo de lavra máximo para a frente  $i$  (t/h) {pe}

O ritmo de lavra na frente  $i$  deve ser menor ou igual ao ritmo de lavra máximo para a frente  $i$ .

$$x_1 \leq 300 \text{ (t/h)}$$

$$x_2 \leq 300 \text{ (t/h)}$$

$$x_3 \leq 300 \text{ (t/h)}$$

$$5) x_i \geq 0$$

$x_i$  = ritmo de lavra na frente  $i$  (t/h) {vdd}

$$x_1 \geq 0$$

$$x_2 \geq 0$$

$$x_3 \geq 0$$

$$6) P^+, P^- \geq 0$$

$P^+$

= desvio positivo do ritmo de lavra recomendado relativo ao minério (t/h) {vdd}

$P^-$

= desvio negativo do ritmo de lavra recomendado relativo ao minério (t/h) {vdd}

$$7) y_{ik} \leq 1$$

$y_{ik} = 1$  se o equipamento de carga opera na frente  $i$  {vdd}

$y_{ik} = 0$  caso contrário

$$8) x_i - (C_{uk} * y_{ik}) \leq 0$$

$x_i$  = ritmo de lavra na frente  $i$  (t/h) {vdd}

$C_{uk}$  = produção máxima do equipamento de carga  $k$  (t/h) {pe}

$y_{ik} = 1$  se o equipamento de carga opera na frente  $i$  {vdd}

$y_{ik} = 0$  caso contrário

O ritmo de lavra na frente  $i$  deve ser menor ou igual à produção máxima do equipamento de carga  $k$  que opera na frente  $i$ .

$$x_1 - (300 * 1) \leq 0$$

$$x_2 - (300 * 1) \leq 0$$

$$x_3 - (300 * 1) \leq 0$$

$$9) x_i - (C_{lk} * y_{ik}) \geq 0$$

$C_{lk}$  = produção mínima do equipamento de carga  $k$  na frente  $i$  (t/h) {pe}

$y_{ik} = 1$  se o equipamento de carga opera na frente  $i$  {vdd}

$y_{ik} = 0$  caso contrário

O ritmo de lavra na frente  $i$  deve ser maior ou igual à produção mínima do equipamento de carga  $k$  que opera na frente  $i$ .

$$x_1 - (200 * 1) \geq 0$$

$$x_2 - (200 * 1) \geq 0$$

$$x_3 - (200 * 1) \geq 0$$

$$10) n_{il} tc_{il} - 60 y_{ik} \leq 0$$

$n_{il}$  = número de viagens que um caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  em uma hora {vdd}

$tc_{il}$  = tempo total de ciclo do caminhão  $l$  na frente  $i$  (minutos){pe}

$y_{ik} = 1$  se o equipamento de carga opera na frente  $i$  {vdd}

$y_{ik} = 0$  caso contrário

O número de viagens que um caminhão  $l$  realiza em uma hora, multiplicado pelo tempo de ciclo deste caminhão  $l$  em minutos, deve ser menor ou igual a 60 minutos.

$$(n_{11} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{12} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{13} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{11} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{21} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{22} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{13} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{31} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{32} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{33} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{41} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{42} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{43} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{51} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{52} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{53} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{61} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{61} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{62} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{63} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{71} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{72} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{73} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{81} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{82} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{83} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{91} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{92} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{93} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{101} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{102} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{103} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{111} * 15,41) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{112} * 13,29) - 60 * 1 \leq 0$$

$$(n_{113} * 10,02) - 60 * 1 \leq 0$$

$$11) 1/60 (n_{il} tc_{il}) \leq T_x Max_l$$

$n_{il}$  = número de viagens que um caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  em uma hora {vdd}

$tc_{il}$  = tempo total de ciclo do caminhão  $l$  na frente  $i$  (minutos){pe}

$T_x Max_l$  = taxa máxima de utilização admitida ao caminhão  $l$ . {pe}

O número de viagens que um caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  em uma hora, multiplicado pelo tempo de ciclo deste caminhão em minutos, deve ser menor ou igual à taxa de utilização máxima admitida para o caminhão  $l$ .

$$1/60 * n_{11} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{12} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{13} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{21} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{22} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{23} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{31} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{32} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{33} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{41} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{42} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{43} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{51} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{52} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{53} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{61} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{62} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{63} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{71} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{72} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{73} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{81} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{82} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{83} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{91} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{92} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{93} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{101} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{102} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{103} * 10,02 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{111} * 15,41 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{112} * 13,29 \leq 0,85$$

$$1/60 * n_{113} * 10,02 \leq 0,85$$

$$12) x_i - n_{il} \text{ cap}_l = 0$$

$x_i$  = ritmo de lavra na frente  $i$  (t/h) {vdd}

$n_{il}$  = número de viagens que um caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  em uma hora {vdd}

$\text{cap}_l$  = capacidade do caminhão  $l$  (t){pe}'

O ritmo de lavra na frente  $i$  deve ser menor ou igual ao produto entre o número de viagens que o caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  em uma hora e a capacidade do caminhão  $l$ .

$$x_1 - n_{11} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{12} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{13} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{21} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{22} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{23} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{31} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{32} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{33} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{41} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{42} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{43} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{51} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{52} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{53} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{61} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{62} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{63} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{71} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{72} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{73} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{81} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{82} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{83} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{91} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{92} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{93} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{101} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{102} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{103} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{111} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{112} * 60 = 0$$

$$x_1 - n_{113} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{11} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{12} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{13} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{21} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{22} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{23} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{31} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{32} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{33} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{41} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{42} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{43} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{51} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{52} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{53} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{61} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{62} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{63} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{71} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{72} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{73} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{81} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{82} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{83} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{101} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{102} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{103} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{111} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{112} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{113} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{11} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{12} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{13} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{21} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{22} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{23} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{31} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{32} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{33} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{41} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{42} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{43} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{51} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{52} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{53} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{61} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{62} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{83} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{91} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{92} * 60 = 0$$

$$x_2 - n_{93} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{63} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{71} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{72} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{73} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{81} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{82} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{83} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{91} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{92} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{93} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{101} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{102} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{103} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{111} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{112} * 60 = 0$$

$$x_3 - n_{113} * 60 = 0$$

$$13) \text{usou}_l \geq 1/60 \ n_{il} \ tc_{il}$$

$\text{usou}_l$

= variável binária que assume valor 1 se o caminhão  $l$  é usado e 0, caso contrário. {vdd}

$n_{il}$  = número de viagens que um caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  em uma hora {vdd}

$tc_{il}$  = tempo total de ciclo do caminhão  $l$  na frente  $i$  (minutos){pe}

A variável binária  $\text{usou}_l$  deve ser maior ou igual ao produto entre o número de viagens que o caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  e o tempo de ciclo do caminhão  $l$  na frente  $i$  em minutos.

$$\text{usou}_1 \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$\text{usou}_1 \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$\text{usou}_1 \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$\text{usou}_1 \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$\text{usou}_1 \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$\text{usou}_1 \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$



$$usou_1 \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$sou_1 \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_2 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$\begin{aligned}
usou_2 &\geq 1/60 * n_{101} * 15,41 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{43} * 10,02 \\
usou_2 &\geq 1/60 * n_{102} * 13,29 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{51} * 15,41 \\
usou_2 &\geq 1/60 * n_{103} * 10,02 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{52} * 13,29 \\
usou_2 &\geq 1/60 * n_{111} * 15,41 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{53} * 10,02 \\
usou_2 &\geq 1/60 * n_{112} * 13,29 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{61} * 15,41 \\
usou_2 &\geq 1/60 * n_{113} * 10,02 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{62} * 13,29 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{11} * 15,41 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{63} * 10,02 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{12} * 13,29 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{71} * 15,41 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{13} * 10,02 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{72} * 13,29 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{21} * 15,41 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{73} * 10,02 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{22} * 13,29 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{81} * 15,41 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{23} * 10,02 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{82} * 13,29 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{31} * 15,41 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{83} * 10,02 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{32} * 13,29 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{91} * 15,41 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{33} * 10,02 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{92} * 13,29 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{41} * 15,41 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{93} * 10,02 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{42} * 13,29 & usou_3 &\geq 1/60 * n_{101} * 15,41 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{102} * 13,29 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{23} * 10,02 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{103} * 10,02 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{31} * 15,41 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{111} * 15,41 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{32} * 13,29 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{112} * 13,29 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{33} * 10,02 \\
usou_3 &\geq 1/60 * n_{113} * 10,02 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{41} * 15,41 \\
usou_4 &\geq 1/60 * n_{11} * 15,41 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{42} * 13,29 \\
usou_4 &\geq 1/60 * n_{12} * 13,29 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{43} * 10,02 \\
usou_4 &\geq 1/60 * n_{13} * 10,02 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{51} * 15,41 \\
usou_4 &\geq 1/60 * n_{21} * 15,41 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{52} * 13,29 \\
usou_4 &\geq 1/60 * n_{22} * 13,29 & usou_4 &\geq 1/60 * n_{53} * 10,02
\end{aligned}$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_4 \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_5 \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_6 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_1 \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_7 \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_8 \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_9 \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_{10} \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{11} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{12} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{13} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{21} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{22} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{23} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{31} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{32} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{33} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{41} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{42} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{43} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{51} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{52} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{53} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{61} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{62} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{63} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{71} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{72} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{73} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{81} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{82} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{83} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{91} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{92} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{93} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{101} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{102} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{103} * 10,02$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{111} * 15,41$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{112} * 13,29$$

$$usou_{11} \geq 1/60 * n_{113} * 10,02$$

$$14) n_{il} \in Z^+$$

$n_{il}$  = número de viagens que um caminhão  $l$  realiza na frente  $i$  em uma hora {vdd}

$$15) usou_l \in \{0,1\}$$

$usou_l$

= variável binária que assume valor 1 se o caminhão  $l$  é usado e 0, caso contrário. {vdd}



## ANEXO C – Relatórios de solução da situação inicial e cenários

### 1 Situação inicial

Global optimal solution found.  
Objective value: 250.0000  
Objective bound: 250.0000  
Infeasibilities: 0.000000  
Extended solver steps: 186  
Total solver iterations: 1134  
Elapsed runtime seconds: 1.25  
Export Summary Report  
-----

Transfer Method: OLE BASED  
Workbook: ADC(R).xls  
Ranges Specified: 1  
nViagens  
Ranges Found: 1  
Range Size Mismatches: 0  
Values Transferred: 510  
Export Summary Report  
-----

Transfer Method: OLE BASED  
Workbook: ADC(R).xls  
Ranges Specified: 1  
x  
Ranges Found: 1  
Range Size Mismatches: 0  
Values Transferred: 17  
Export Summary Report  
-----

Transfer Method: OLE BASED  
Workbook: ADC(R).xls  
Ranges Specified: 1  
y  
Ranges Found: 1  
Range Size Mismatches: 0  
Values Transferred: 136  
Export Summary Report  
-----

Transfer Method: OLE BASED  
Workbook: ADC(R).xls  
Ranges Specified: 1  
dnm  
Ranges Found: 1  
Range Size Mismatches: 0  
Values Transferred: 10  
Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dpm  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 10  
 Export Summary Report  
 -----

**TRANSFER METHOD: OLE BASED**

Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dnp  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 1  
 Export Summary Report  
 -----

Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dpp  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 1  
 Model Class: MILP  
 Total variables: 715  
 Nonlinear variables: 0  
 Integer variables: 676  
 Total constraints: 681  
 Nonlinear constraints: 0  
 Total nonzeros: 1873  
 Nonlinear nonzeros: 0

**2 Primeiro cenário**

Global optimal solution found.  
 Objective value: 400.0000  
 Objective bound: 400.0000  
 Infeasibilities: 0.000000  
 Extended solver steps: 520164  
 Total solver iterations: 7170416  
 Elapsed runtime seconds: 569.90  
 Export Summary Report  
 -----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

nViagens

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 510

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

x

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 17

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

y

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 136

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

dnm

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 10

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

dpm

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 10

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

dnp  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 1  
 Export Summary Report  
 -----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dpp  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 1  
 Model Class: MILP  
 Total variables: 715  
 Nonlinear variables: 0  
 Integer variables: 676  
 Total constraints: 681  
 Nonlinear constraints: 0  
 Total nonzeros: 1873  
 Nonlinear nonzeros: 0

### 3 Segundo cenário

Global optimal solution found.  
 Objective value: 2280.000  
 Objective bound: 2280.000  
 Infeasibilities: 0.000000  
 Extended solver steps: 10565  
 Total solver iterations: 61171  
 Elapsed runtime seconds: 7.86  
 Export Summary Report  
 -----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 nViagens  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 510  
 Export Summary Report  
 -----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 x  
 Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 17

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

y

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 136

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

dnm

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 10

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

dpm

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 10

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

dnp

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 1

Export Summary Report

-----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls

Ranges Specified: 1

dpp

Ranges Found: 1

Range Size Mismatches: 0

Values Transferred: 1

Model Class: MILP  
 Total variables: 715  
 Nonlinear variables: 0  
 Integer variables: 676  
 Total constraints: 681  
 Nonlinear constraints: 0  
 Total nonzeros: 1873  
 Nonlinear nonzeros: 0

#### 4 Terceiro cenário

Global optimal solution found.  
 Objective value: 5300.000  
 Objective bound: 5300.000  
 Infeasibilities: 0.000000  
 Extended solver steps: 0  
 Total solver iterations: 146  
 Elapsed runtime seconds: 0.88  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 nViagens  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 510  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 x  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 17  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 y  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 136  
 Export Summary Report

Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dnm  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 10  
 Export Summary Report  
 -----

Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dpm  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 10  
 Export Summary Report  
 -----

Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dnp  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 1  
 Export Summary Report  
 -----

Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dpp  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 1  
 Model Class: MILP  
 Total variables: 715  
 Nonlinear variables: 0  
 Integer variables: 676  
 Total constraints: 681  
 Nonlinear constraints: 0  
 Total nonzeros: 1873  
 Nonlinear nonzeros: 0

## 5 Quarto cenário

Global optimal solution found.

Objective value: 280.0000  
 Objective bound: 280.0000  
 Infeasibilities: 0.000000  
 Extended solver steps: 1  
 Total solver iterations: 512  
 Elapsed runtime seconds: 1.09  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 nViagens  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 510  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 x  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 17  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 y  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 136  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dnm  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0  
 Values Transferred: 10  
 Export Summary Report

-----  
 Transfer Method: OLE BASED  
 Workbook: ADC(R).xls  
 Ranges Specified: 1  
 dpm  
 Ranges Found: 1  
 Range Size Mismatches: 0



Values Transferred: 10  
Export Summary Report

-----  
Transfer Method: OLE BASED

Workbook: ADC(R).xls  
Ranges Specified: 1  
dnp  
Ranges Found: 1  
Range Size Mismatches: 0  
Values Transferred: 1  
Export Summary Report

-----  
Transfer Method: OLE BASED  
Workbook: ADC(R).xls  
Ranges Specified: 1  
dpp  
Ranges Found: 1  
Range Size Mismatches: 0  
Values Transferred: 1  
Model Class: MILP  
Total variables: 715  
Nonlinear variables: 0  
Integer variables: 676  
Total constraints: 681  
Nonlinear constraints: 0  
Total nonzeros: 1873  
Nonlinear nonzeros: 0