



PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES: ABORDAGENS EXATA E HEURÍSTICA

Autor: Francisco César Rodrigues de Araújo

Orientador: Prof. Dr. Marccone Jamilson Freitas Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral, área de concentração: Lavra de Minas.

Ouro Preto, 27 de junho de 2008

**PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE LAVRA COM ALOCAÇÃO
DINÂMICA DE CAMINHÕES: ABORDAGENS EXATA E
HEURÍSTICA**

Francisco César Rodrigues de Araújo

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 27 de junho de 2008, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza (Orientador/UFOP)

Prof. Dr. Luiz Henrique de Campos Merschmann (UFOP)

Prof. Dr. Luiz Satoru Ochi (UFF)

Agradecimentos

A Deus, por tudo.

A meu orientador, Professor Marcone Jamilson Freitas Souza, minha referência não só pela capacidade intelectual incomparável, mas principalmente como pessoa, pela amizade e apoio demonstrados ao longo dos anos.

A meus pais pelo exemplo de vida.

Aos filhos, Marcella e Giuliano, pela compreensão e carinho que nunca faltaram.

À LÍlian, pelo incentivo.

Aos colegas professores Ronaldo Trindade e Adolfo Baudson, pela colaboração sempre que solicitados.

Às empresas mineradoras da região do quadrilátero ferrífero pelo suporte.

À FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

À UFOP e ao CEFET Ouro Preto pela oportunidade e por fazerem parte da minha vida.

A todos que, de alguma maneira, ajudaram-me a concluir esse trabalho.

Resumo

Este trabalho trata do planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões. Este problema consiste em determinar o número de viagens que cada caminhão deve fazer a cada frente de lavra, bem como decidir em quais frentes de lavra alocar as carregadeiras, de sorte a atender às metas de produção e qualidade requeridas para o minério a ser produzido, fazendo o melhor aproveitamento da frota de veículos disponível. Dada sua complexidade combinatória, o problema é abordado por um procedimento heurístico baseado na metaheurística *Iterated Local Search*. Também é formulado um modelo de programação matemática, o qual serve para validar o método heurístico proposto. Os modelos propostos são testados por meio da utilização de dados reais em um *software* desenvolvido para este fim.

Palavras-Chave: Planejamento de lavra em minas a céu aberto, Alocação Dinâmica de Caminhões, Planejamento da produção, *Iterated Local Search*, Programação Linear por Metas, Metaheurísticas.

Abstract

This work deals with the Operational Mining Planning in open pit mines with equipment dynamic allocation. This problem consists in determining the number of trips that each truck would do in each mining site as well as deciding in which mining site to allocate the loaders machines, in order to attend the production and quality goals required to the ore production, doing the best utilization of the available vehicle fleet. Due to the combinatorial complexity of the problem, it is solved using a heuristic procedure based on the Iterated Local Search metaheuristic. Also it is proposed a model of mathematical programming, which serves to validate the proposed metaheuristic method. The proposed models are validated by the utilization of real data in a software developed for this purpose.

Keywords: Operational Mining Planning in open pit mines, Equipment Dynamic Allocation, Production planning, Iterated Local Search, Goal Programming, Metaheuristics.

Sumário

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT.....	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XI
1. PRELIMINARES	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE LAVRA COM ALOCAÇÃO DINÂMICA DE CAMINHÕES	4
2.1 PLANEJAMENTO DE LAVRA.....	4
2.1.1 <i>Introdução</i>	4
2.1.2 <i>Descrição do Planejamento</i>	5
2.2 ALOCAÇÃO DE CAMINHÕES.....	12
2.2.1 <i>Alocação Estática de Caminhões</i>	14
2.2.2 <i>Alocação Dinâmica de Caminhões</i>	15
2.3 CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO ABORDADO.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 INTRODUÇÃO	18
3.2 PROGRAMAÇÃO POR METAS	22
3.3 O MODELO DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE COSTA <i>ET AL.</i> (2004)	25
3.4 HEURÍSTICAS	29
3.4.1 <i>Introdução</i>	29
3.4.2 <i>Metaheurísticas</i>	31
4. MODELAGEM DO PROBLEMA ABORDADO	35
4.1 INTRODUÇÃO	35
4.2 MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	35
4.3 MODELO HEURÍSTICO	40
4.3.1 <i>Dados de Entrada</i>	40
4.3.2 <i>Representação de uma Solução</i>	40

4.3.3	<i>Geração de uma Solução Inicial</i>	42
4.3.4	<i>Avaliação de uma Solução.....</i>	48
4.3.5	<i>Movimentos e Estruturas de Vizinhanças.....</i>	52
4.3.6	<i>Métodos de Busca Local Aplicados ao Planejamento de Lavra</i>	59
4.3.7	<i>Perturbações.....</i>	67
4.3.8	<i>Iterated Local Search (ILS)</i>	81
4.4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	88
4.4.1	<i>Tela de abertura.....</i>	88
4.4.2	<i>Tela principal do sistema.....</i>	89
4.4.3	<i>Tela de relatório das soluções inicial e final.....</i>	90
4.4.4	<i>Tela de relatório do número de viagens de cada caminhão.....</i>	91
4.4.5	<i>Tela do Tempo de Ciclo dos Caminhões</i>	92
4.4.6	<i>Tela de Compatibilidade entre Caminhões e Carregadeiras</i>	92
4.4.7	<i>Tela com a Capacidade Máxima de cada Caminhão.</i>	93
4.4.8	<i>Tela com a Capacidade Mínima de cada Carregadeira.</i>	94
4.4.9	<i>Tela com a Capacidade Máxima de cada Carregadeira.....</i>	94
5.	RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	96
5.1	INTRODUÇÃO	96
5.2	RESULTADOS OBTIDOS.....	99
5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	106
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
	ANEXO I: PROBLEMAS-TESTE.....	115
	ANEXO II: MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA	119
	ANEXO III: PUBLICAÇÕES	123

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Modelo de Carregadeira (L1850)	6
Figura 2.2 – Modelo de Caminhão	7
Figura 2.3 – Pilha de Estoque	8
Figura 2.4 – Britador	9
Figura 2.5 – Correia transportadora	10
Figura 2.6 – Modelo de Caminhão Pipa	11
Figura 2.7 – Modelo de Motoniveladora	11
Figura 2.8 – Processo Produtivo de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero	12
Figura 2.9 – Equipamentos de Transporte e de Carga	13
Figura 2.10 – Alocação Estática de Caminhões	14
Figura 2.11 – Alocação Dinâmica de Caminhões	15
Figura 3.1 – Método da Descida	30
Figura 3.2 – Método Randômico de Descida	31
Figura 3.3 – Pseudocódigo para o procedimento <i>ILS</i>	33
Figura 3.4 – Pseudocódigo do algoritmo VND	34
Figura 4.1 – Representação de uma Solução	41
Figura 4.2 – Alocação Aleatória das Carregadeiras	43
Figura 4.3 – Número de Viagens de cada Caminhão às diversas Frentes	44
Figura 4.4 – Massa Lavrável em cada Frente	44
Figura 4.5 – Somatório dos Tempos de Ciclo por Caminhão	45
Figura 4.6 – Reparador de Inviabilidade do Número de Viagens	46
Figura 4.7 – Reparador de Inviabilidade de Massa Lavrável	47
Figura 4.8 – Movimento Retirar_uma_viagem	53
Figura 4.9 – Movimento Retirar_duas_viagens	53
Figura 4.10 – Movimento Realocar uma Viagem mantendo o caminhão	54
Figura 4.11 – Movimento Realocar uma Viagem mantendo a frente	55
Figura 4.12 – Movimento Realocar Carregadeira	55
Figura 4.13 – Movimento Ativar Carregadeira	56
Figura 4.14 – Movimento Desativar Carregadeira	57
Figura 4.15 – Movimento Inserir uma viagem	58
Figura 4.16 – Movimento Retirar Viagens	58
Figura 4.17 – Movimento Trocar Carregadeira	59
Figura 4.18 – Descida_tirar_uma_viagem	60
Figura 4.19 – Descida_tirar_duas_viagens	61
Figura 4.20 – Descida_realocação_de_viagem_mantendo_caminhão	62
Figura 4.21 – Descida_realocação_de_viagem_mantendo_frente	63
Figura 4.22 – Descida_inserir_uma_viagem	64
Figura 4.23 – Descida_tirar_viagens	65
Figura 4.24 – Descida_desativar_carregadeira	66
Figura 4.25 – Descida_realocar_carregadeira	67
Figura 4.26 – Perturbação_Retirar_uma_viagem	68
Figura 4.27 – Perturbação_Retirar_duas_viagens	69

Figura 4.28 – Perturbação Realocar uma Viagem mantendo o caminhão.....	71
Figura 4.29 – Perturbação Realocar uma Viagem mantendo a frente	72
Figura 4.30 – Perturbação Realocar Carregadeira	74
Figura 4.31 – Perturbação Desativar Carregadeira.....	75
Figura 4.32 – Perturbação Ativar Carregadeira.....	76
Figura 4.33 – Perturbação Trocar Carregadeira.....	78
Figura 4.34 – Perturbação_tirar_viagens	79
Figura 4.35 – Perturbação_Retirar_uma_viagem	80
Figura 4.36 – <i>Iterated Local Search</i>	81
Figura 4.37 – Níveis de perturbação do ILS	82
Figura 4.38 – Perturbação desativar uma carregadeira.....	83
Figura 4.39 – Perturbação_n1	83
Figura 4.40 – Perturbação_n2	84
Figura 4.41 – Perturbação tirar todas as viagens	84
Figura 4.42 – Perturbação_n3.....	85
Figura 4.43 – Perturbação ativar uma carregadeira	86
Figura 4.44 – Perturbação trocar carregadeira ativa/inativa	86
Figura 4.45 – Algoritmo VND.....	87
Figura 4.46 – Tela de abertura do sistema	88
Figura 4.47 – Tela principal.....	89
Figura 4.48 – Tela das soluções inicial e final.....	90
Figura 4.49 – Tela do número de viagens de cada caminhão	91
Figura 4.50 – Tela do tempo de ciclo dos caminhões.....	92
Figura 4.51 – Tela de compatibilidade entre caminhões e carregadeiras	93
Figura 4.52 – Tela com a capacidade máxima de cada caminhão.....	93
Figura 4.53 – Tela com a capacidade mínima de cada carregadeira	94
Figura 4.54 – Tela com a capacidade máxima de cada carregadeira.....	95

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Problemas-teste	96
Tabela 5.2 – Metas de produção e qualidade, número de equipamentos disponíveis e prioridades	97
Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados	98
Tabela 5.4 – Características dos melhores resultados obtidos.....	99
Tabela 5.5 – Desvios percentuais dos parâmetros de controle da melhor solução em relação às metas estabelecidas	100
Tabela 5.6 – Valores médios obtidos.....	100
Tabela 5.7 – Desvios percentuais encontrados para algumas características das soluções.	101
Tabela 5.8 – Características das soluções do otimizador no tempo da melhor solução do ILS	102
Tabela 5.9 – Características das soluções do otimizador no tempo médio do ILS.....	102
Tabela 5.10 – Percentual de melhora do ILS em relação ao LINGO no tempo da melhor solução do ILS	103
Tabela 5.11 – Percentual de melhora do ILS em relação ao LINGO no tempo médio de processamento do ILS.....	104
Tabela 5.12 – Características das soluções obtidas pelo otimizador em uma hora de processamento.....	105
Tabela 5.13 – Características das soluções obtidas pelo otimizador em 20 horas de processamento.....	105
Tabela 5.14 – Comparação entre o LINGO e o melhor desempenho do ILS.....	106

Lista de Siglas e Abreviaturas

AG	Algoritmo Genético
ARENA	Software de Simulação
BT	Busca Tabu
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedures</i>
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
LINGO	Modelador e Otimizador de Programação Linear e Inteira
NP	Não Polinomial
OTISIMIN	Otimizador e Simulador para Mineração
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PO	Pesquisa Operacional
SA	<i>Simulated Annealing</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>
VND	<i>Variable Neighborhood Descent</i>

1. Preliminares

1.1 Introdução

A Pesquisa Operacional (PO) é uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais envolvendo situações de tomada de decisão, através de modelos matemáticos habitualmente processados computacionalmente. Ela aplica conceitos e métodos de outras disciplinas científicas na concepção, no planejamento ou na operação de sistemas para atingir seus objetivos. Procura, assim, introduzir elementos de objetividade e racionalidade nos processos de tomada de decisão, sem descuidar, no entanto, dos elementos subjetivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas.

O termo Pesquisa Operacional, do inglês *Operations Research*, foi empregado pela primeira vez em 1939 como uma tentativa de englobar, sob uma única denominação, todas as técnicas existentes ou que viriam a ser desenvolvidas e que tinham o mesmo objetivo citado.

De uma maneira geral, todas as disciplinas que constituem a PO se apóiam em quatro ciências fundamentais: Economia, Matemática, Estatística e Informática.

O objetivo principal da Pesquisa Operacional é encontrar a melhor utilização de recursos limitados procurando determinar o uso otimizado de atividades ou recursos, fornecendo um conjunto de procedimentos e métodos quantitativos para tratar de forma sistêmica problemas que envolvam a utilização de recursos escassos.

Dentre as aplicações da PO, inclui-se sua utilização em planejamento de lavra a céu aberto, em especial, na alocação de máquinas e caminhões às frentes de lavra.

Estudos como os de Chanda e Dagdelen (1995), Alvarenga (1997), Pinto e Merschmann (2001), Merschmann (2002), Pinto *et al.* (2003), Costa *et al.* (2004) e Costa (2005) têm utilizado a Pesquisa Operacional com o objetivo de aplicar metodologias para a solução de problemas inerentes ao planejamento de lavra. Tais esforços se concentraram na aplicação de técnicas de otimização (programação linear e métodos heurísticos).

Nesta investigação trata-se o problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões. O objetivo é aperfeiçoar o modelo de programação matemática de Costa *et al.* (2004), incluindo uma nova restrição relativa à utilização dos caminhões, bem como apresentar um novo modelo heurístico.

A utilização de técnicas heurísticas para resolver este problema se justifica face à sua natureza combinatória. Este fato torna proibitiva sua resolução por técnicas exatas quando o número de variáveis é elevado e o tempo para a tomada de decisão é baixo. O modelo heurístico proposto é baseado na metaheurística *Iterated Local Search* (LOURENÇO, MARTIN e STÜTZLE, 2003). Apesar de estas técnicas heurísticas não garantirem a otimalidade da solução, elas conseguem, em geral, produzir soluções de boa qualidade rapidamente. Dentre as heurísticas, destacam-se as chamadas metaheurísticas, as quais, ao contrário das heurísticas convencionais, têm caráter geral e são providas de mecanismos para tentar escapar de ótimos locais, ainda distantes de um ótimo global (SOUZA, 2007). O modelo heurístico proposto será validado pelo modelo de programação matemática.

1.2 Justificativa

As soluções para o problema de planejamento de lavra com alocação dinâmica de caminhões podem ser encontradas utilizando diversos métodos. O primeiro deles, ainda utilizado em algumas empresas de mineração, é o manual. É uma tarefa árdua, dado o elevado número de combinações a testar e o pouco tempo que se tem para a tomada de decisão. Outra forma de se encontrar uma solução para este problema é formulá-lo como um modelo de programação matemática e resolvê-lo por um software de otimização, como por exemplo, o LINGO, o CPLEX e o XPRESS. O inconveniente neste caso é o alto custo associado à utilização desta metodologia. Além disso, o problema é da classe NP-difícil, o que significa que esta metodologia pode não conseguir resolver em tempo hábil casos reais deste problema.

O método proposto e modelado no capítulo 4 é uma alternativa aos métodos atualmente utilizados na alocação dinâmica de caminhões em lavra de mina a céu aberto. Em vista do potencial das metaheurísticas e a facilidade de sua implementação, a

expectativa é que soluções de melhor qualidade sejam produzidas a um custo de desenvolvimento mais baixo.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado como segue. No presente capítulo foi contextualizada a pesquisa operacional nas aplicações em empresas de mineração e apresentada a justificativa do presente trabalho.

No capítulo 2 é descrito em detalhes o problema abordado.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica de aplicações de pesquisa operacional na mineração, bem como de técnicas de programação matemática e de técnicas heurísticas.

No capítulo 4 é apresentada uma modelagem de programação matemática para o problema abordado e, ainda, uma modelagem heurística e sua implementação computacional.

No capítulo 5 são apresentados, discutidos e analisados os resultados obtidos pela aplicação do modelo proposto a um conjunto de diferentes cenários.

O capítulo 6 conclui o trabalho e apresenta propostas para trabalhos futuros.

2. Problema de Planejamento de Lavra com Alocação Dinâmica de Caminhões

2.1 Planejamento de Lavra

2.1.1 Introdução

Em praticamente todas as empresas de mineração, principalmente as de médio e grande porte, há a necessidade de se fazer um planejamento estratégico de retirada (exploração) de minério para atender às necessidades do mercado. Isto se deve ao fato de que nessas situações o ser humano não consegue analisar todos os cenários possíveis e detectar as melhores opções em tempos compatíveis.

Para executar essa tarefa, conhecida como Planejamento de Lavra, é necessário se conhecer com riqueza de detalhes a área a ser explorada e explotada.

Normalmente, um planejamento é elaborado considerando-se três fases: longo, médio e curto prazo. Na primeira fase, a de longo prazo, faz-se um planejamento mais amplo. Por exemplo, pensa-se na mina para alguns anos. Na segunda, a de médio prazo, faz-se um planejamento para até um ano e na terceira fase, a de curto prazo, trabalha-se num planejamento diário, mensal e até trimestral. É importante salientar que esses intervalos de tempo não são rígidos e, portanto, podem variar de uma empresa para outra.

O planejamento de curto prazo é normalmente realizado por profissionais de Geologia, Engenharia de Minas, Qualidade, Produção e Administração. Esta equipe se interage com o objetivo final de atender ao cliente e é a mais exigida tendo em vista a necessidade de se cumprir tudo aquilo que fora pré-estabelecido pelas equipes responsáveis pelo longo e médio prazo.

Mostra-se, a seguir, o processo produtivo de uma empresa mineradora de ferro, situada no Quadrilátero Ferrífero, na região central do Estado de Minas Gerais.

2.1.2 Descrição do Planejamento

De posse dos dados relativos à quantidade e qualidade do minério disponível na mina, pode-se falar em vida útil desta. Essa é uma tarefa das equipes de médio e longo prazo, que objetivam fazer o planejamento para atender ao mercado por um dado período. Evidentemente que, em função do avanço da tecnologia, esse tempo pode variar para mais ou para menos. Material antes considerado estéril poderá, no futuro, ser economicamente aproveitado como minério. Em contra-partida, equipamentos de melhor qualidade e *softwares* mais eficazes poderão fazer com que a mina seja exaurida mais rapidamente.

De posse dessas informações, a equipe de curto prazo da empresa analisada planeja como atender às necessidades por um período de até 3 meses. O planejamento é feito para o dia, o mês e o trimestre.

Com a ajuda de *softwares* elaborados para este fim, a equipe do planejamento determina aos diversos setores envolvidos (Qualidade, Sistema de Despacho e Produção) quais são as frentes a serem lavradas bem como quais e quantos equipamentos serão envolvidos (operação de alocação de máquinas e caminhões).

O objetivo é elaborar um plano diário de tal forma que ao final do mês e também do trimestre, as metas sejam atingidas tanto em qualidade quanto em quantidade.

Após se escolher as frentes de lavra, os equipamentos de carga e de transporte, inicia-se todo o processo que começa na mina com a extração do material (minério e estéril), passando pelo(s) britador(es) e terminando nas pilhas de homogeneização.

O processo produtivo dessa empresa mineradora se desenvolve a partir da execução das ações elaboradas por uma equipe formada por profissionais de diversas áreas.

Os operadores, com a ajuda de *softwares*, repassam as informações à equipe da produção (técnicos, operadores das máquinas, operadores dos caminhões). Esses, por sua vez, fazem o minério chegar ao(s) britador(es) ou às pilhas de estoque.

Os equipamentos de carga e descarga trabalham sob orientação da equipe responsável pelo sistema de despacho.

A Figura 2.1 mostra um tipo de equipamento utilizado para o carregamento de minério e estéril da mina.



Figura 2.1 – Modelo de Carregadeira (L1850)

A partir do carregamento, o condutor do veículo responsável pelo transporte do material recebe instruções da equipe de despacho para fazer o descarregamento.

A Figura 2.2 mostra um tipo de equipamento utilizado para transporte de minério e estéril.



Figura 2.2 – Modelo de Caminhão

Esse material pode ser transportado diretamente até ao britador ou depositado em pilhas denominadas de pilhas de estoque.

A Figura 2.3 mostra uma pilha de estoque sendo formada.



Figura 2.3 – Pilha de Estoque

A Figura 2.4 mostra o minério sendo depositado diretamente no britador.



Figura 2.4 – Britador

Após passar pelo(s) britador(es), o minério é transportado por caminhões ou correias transportadoras até as pilhas de homogeneização.

A Figura 2.5 mostra o minério sendo conduzido por correias transportadoras até às pilhas de homogeneização.



Figura 2.5 – Correia transportadora

A todo momento, equipamentos responsáveis pela manutenção das vias (estradas) de acesso ao britador e às pilhas de homogeneização (caminhões pipa e motoniveladora, por exemplo) entram em ação para minimizar os problemas causados pela poeira e pelos “borrachudos”, denominação dada às saliências no piso ocasionadas pelo intenso tráfego de máquinas de grande porte nas estradas.

A Figura 2.6 mostra um equipamento responsável pela minimização da poeira e a Figura 2.7 mostra uma motoniveladora, responsável pela correção do solo.



Figura 2.6 – Modelo de Caminhão Pipa



Figura 2.7 – Modelo de Motoniveladora

Todo esse processo produtivo é supervisionado pela equipe de operação, responsável pelo sistema de despacho, que segue orientações da equipe responsável pela qualidade do minério.

Por isso, é necessário que haja uma sintonia entre todos os setores envolvidos sob pena de não se conseguir atingir as metas diárias.

A Figura 2.8 mostra o fluxograma do processo produtivo de uma outra empresa de mineração do quadrilátero ferrífero.

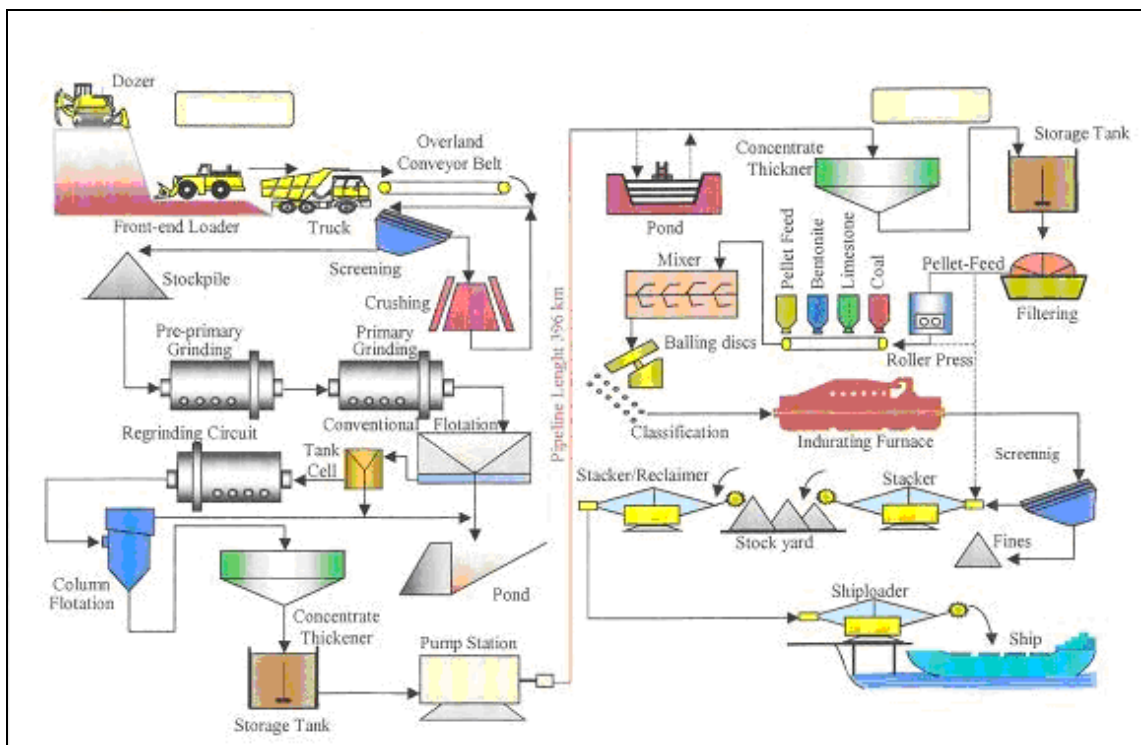


Figura 2.8 – Processo Produtivo de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero

2.2 Alocação de caminhões

No Planejamento de Lavra a Céu Aberto, em especial, na alocação de máquinas e caminhões em uma frente de lavra (Figura 2.9), cada frente contém uma determinada quantidade de minério, com características físicas, químicas e econômicas diferenciadas, denominadas parâmetros de controle.



Figura 2.9 – Equipamentos de Transporte e de Carga

Para satisfazer as especificações exigidas pelos clientes, é necessário selecionar as frentes a serem lavradas e determinar seu ritmo de lavra. Para a operação de minério e estéril, a mina conta com uma frota limitada de equipamentos de carga, os quais devem ser alocados às frentes de lavra e operarem em uma faixa de produtividade que torne viável sua utilização (COSTA, 2005).

O transporte do material retirado da frente de lavra é realizado por uma frota de caminhões com capacidades de carga diferentes. O ritmo de lavra é determinado pelas capacidades de operação dos equipamentos de carga e transporte alocados às diversas frentes.

Em minas a céu aberto, são utilizados dois critérios para a alocação de caminhões: alocação estática e alocação dinâmica.

2.2.1 Alocação Estática de Caminhões

O problema da mistura de minério com alocação estática de caminhões é geralmente adotado devido à simplificação das operações e ao custo relativo à implantação de um sistema de despacho computadorizado de caminhões. Na alocação estática (Figura 2.10), um caminhão é alocado a uma única rota, ou seja, permanece se deslocando entre dois pontos fixos, um de basculamento e outro de carga, onde esteja alocado um equipamento de carga compatível. Desta forma, o ritmo de lavra de uma frente dependerá da capacidade de produção dos caminhões e do equipamento de carga alocados à frente.

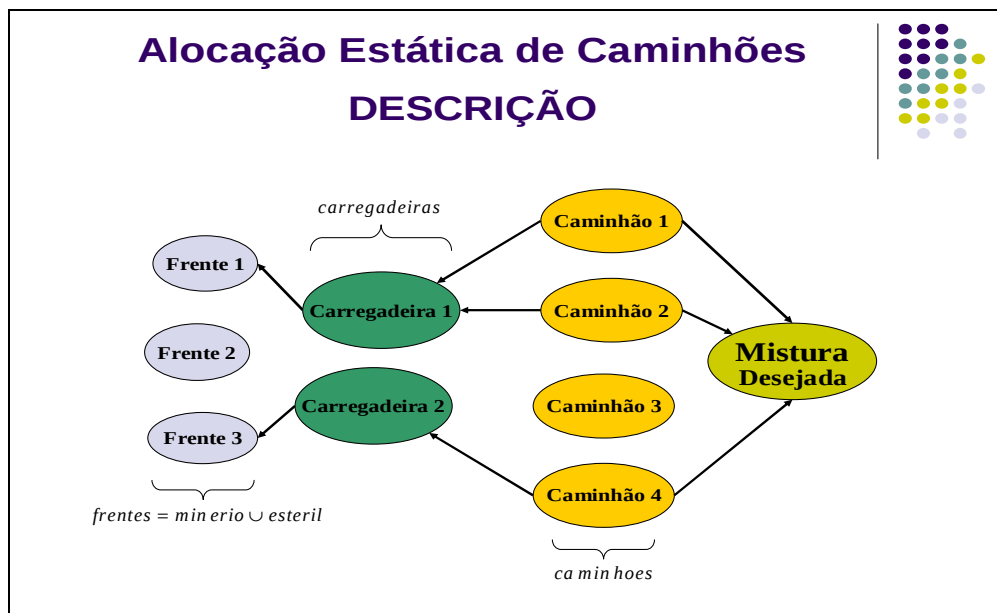


Figura 2.10 – Alocação Estática de Caminhões

2.2.2 Alocação Dinâmica de Caminhões

No sistema de alocação dinâmica (Figura 2.11), os caminhões não ficam fixos a uma determinada frente de lavra, como no modelo estático. Eles podem ser direcionados a diferentes frentes de lavra compatíveis, aumentando a produtividade da frota e proporcionando, segundo Costa (2005), um aumento na capacidade de produção da mina ou a redução do número de equipamentos necessários para manter um determinado nível de produção.

Como desvantagens da alocação dinâmica, apontam-se exigência de um maior número de operações e de um sistema de despacho de caminhões computadorizado.

Nesse sistema é também possível diminuir o tempo de fila, uma vez que o caminhão pode ser alocado a pontos de carga diferentes.

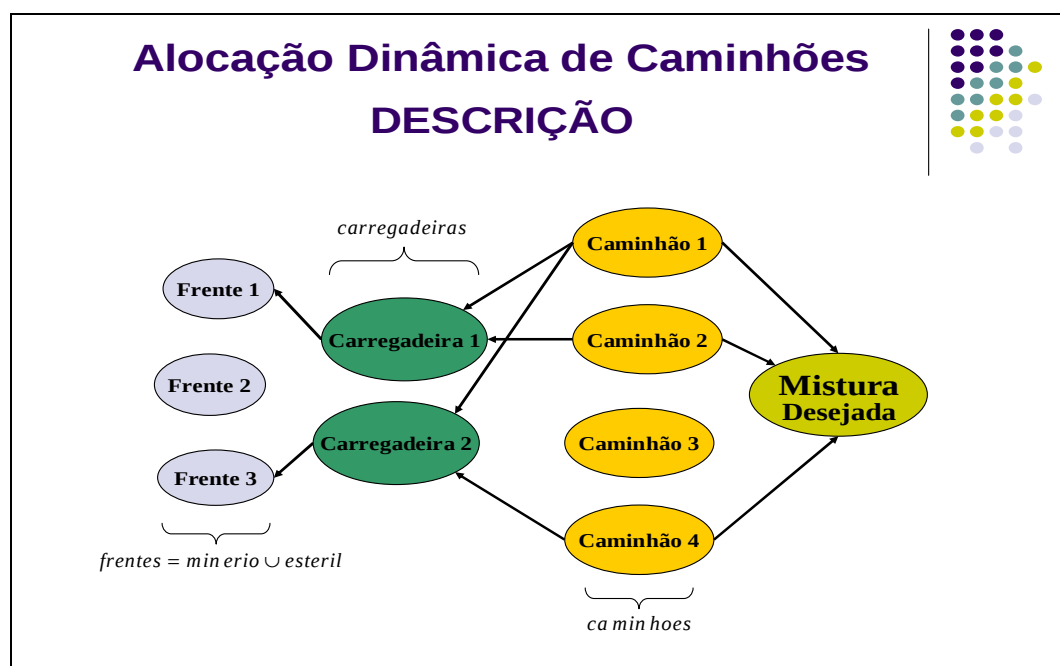


Figura 2.11 – Alocação Dinâmica de Caminhões

2.3 Características do Problema de Alocação Abordado

O problema abordado é o de Planejamento Operacional de Lavra com alocação dinâmica de caminhões, onde há dois pontos de descarga: um para minério e outro para estéril.

Na realidade, apesar de ser considerado um único ponto de descarga para o minério, que normalmente acontece no britador, é possível que esta seja feita em um ponto próximo ao britador. Isto é, considera-se que a distância das frentes ao britador e seus pontos próximos é a mesma. Este procedimento é normalmente admitido nas minerações para evitar fila na descarga junto ao britador. O caminhão encontrando fila no britador descarrega em uma pilha em um ponto próximo do britador e, posteriormente, esse material é retomado para descarga no britador.

Considera-se também que o transporte do material às frentes e ao britador é feito somente por caminhões, no caso de capacidades diferentes.

Sendo a alocação dinâmica, ao descarregar o material, seja no britador (ou pilhas de estoque próximas ao britador) ou na pilha de estéril, o caminhão é direcionado a uma frente, não necessariamente a mesma da viagem anterior.

Admite-se, também, que há um conjunto de carregadeiras de diferentes capacidades de carregamento, sendo este conjunto menor que o conjunto das frentes às quais elas serão alocadas.

Considera-se, também, o planejamento para uma hora de produção, o qual é aplicado até uma frente exaurir ou ocorrer uma parada de equipamento, seja por quebra ou manutenção, situação na qual deve ser feito outro planejamento.

Dado o elevado custo de uma carregadeira, normalmente impõe-se uma quantidade mínima a ser extraída para justificar economicamente sua utilização.

É desejável no planejamento de lavra considerar, também, uma taxa máxima de utilização para os caminhões, ou seja, pode-se desejar que cada caminhão utilizado no transporte de minério e estéril tenha uma produtividade máxima. Por exemplo, supondo uma taxa máxima de utilização de 85%, um caminhão (*I*), com capacidade de 80 t, deveria trabalhar 51 ($0,85 \times 60$) minutos, no máximo, em uma hora. Supondo que o

tempo médio de ciclo (TMC) deste caminhão (I) às diversas frentes seja de 7 minutos por viagem, o número de viagens que esse caminhão conseguiria fazer em 51 minutos é 7. Transformando em toneladas, esse caminhão poderia transportar cerca de 560 t em uma hora (7×80), caso atingisse os 85% de desempenho. Com a introdução desta restrição, o número de caminhões utilizados no transporte do material poderá ser, naturalmente, menor do que aquele conseguido sem a imposição desta taxa.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Introdução

A Pesquisa Operacional tem sido utilizada ultimamente de modo eficaz na resolução de problemas de planejamento de lavra a céu aberto utilizando-se técnicas de otimização, dentre elas a programação linear e os métodos heurísticos.

Mutmansky (1979), apud Costa (2005), relatou que a programação linear é a técnica de pesquisa operacional mais aplicada aos problemas de planejamento de produção em mineração, sendo adotada principalmente pelas minerações a céu aberto, devido à maior complexidade de suas operações em relação às de minas subterrâneas.

White *et al.* (1982), apud Rodrigues (2006), propõem um modelo baseado em programação matemática que minimiza o número de caminhões necessários através de restrições relacionadas à continuidade do fluxo de material pelos pontos de carga e descarga e as capacidades de produção dos pontos de carga.

White e Olson (1986), apud Rodrigues (2006), propuseram um algoritmo que é a base para o sistema *Dispatch*, que vem operando em muitas minas. Esse modelo utiliza programação linear e dinâmica. A programação linear é dividida em duas partes. Na primeira parte do modelo, realiza-se a otimização do problema da mistura conseguindo, através disso, a minimização do remanuseio, forçando uma solução próxima das restrições críticas de blendagem (mistura) e satisfazendo a necessidade de alimentação da planta. A segunda parte do modelo otimiza o transporte na mina por meio da minimização da necessidade de transporte, gerando o fluxo ótimo de transporte no caminho. A programação dinâmica usa o fluxo ótimo no caminho obtido na programação linear, uma lista formada pelos caminhões a serem alocados, os tempos de viagem e as distâncias atuais entre os pontos de carga e descarga e é executada a cada necessidade de alocação de caminhão. Mais especificamente, para cada caminhão a ser alocado, determina-se uma medida de tempo para cada caminho existente na mina e aloca-se o caminhão ao caminho que apresentar o menor valor.

Segundo Munirathinam e Yingling (1994), vários modelos propostos na literatura, entre os quais os de White e Olson (1986), ignoram a natureza estocástica das operações de transporte, carregamento e descarregamento, os quais tendem a introduzir aumento no tempo de espera, em virtude do aumento do número de caminhões alocados a um determinado equipamento de carga.

Chanda & Dagdelen (1995) apresentam um modelo de programação linear por metas aplicado à resolução de um problema de blendagem de minérios no planejamento de curto prazo em uma mina de carvão. O objetivo é maximizar um critério econômico e minimizar a soma dos desvios dos parâmetros individuais de qualidade e da tonelagem em relação aos valores desejados. Os modelos são analisados, comparando-os com os pertencentes a um sistema baseado em gráficos interativos. Melhorias na qualidade dos resultados de planejamento podem ser obtidas, segundo alguns estudos, através da combinação dessas duas técnicas.

Merschmann (2002) desenvolveu um sistema de otimização e simulação para análise de cenário de produção em minas a céu aberto. O sistema denominado OTISIMIN (Otimizador e Simulador para Mineração) foi desenvolvido em dois módulos. O primeiro corresponde ao módulo de otimização onde um modelo de programação linear foi construído e resolvido e o segundo a um módulo de simulação que permite ao usuário utilizar os resultados obtidos na resolução do modelo de programação linear como dados de entrada para a simulação. O módulo de otimização foi elaborado com o objetivo de otimizar o processo de mistura de minérios oriundos das várias frentes de lavra de forma a atender as especificações de qualidade impostas pela usina de tratamento e realizar a alocação de equipamentos (caminhões, carregadeiras e/ou escavadeiras) às frentes de lavra, considerando tanto alocação dinâmica quanto estática dos caminhões.

Os modelos de otimização de Merschmann (2002) foram aperfeiçoados por Costa *et al.* (2004, 2005). Nesses trabalhos, são apresentadas modelagens de programação matemática que reduzem significativamente o número de restrições. Além disso, os modelos incluem o atendimento às metas de produção e qualidade por meio da minimização, na função objetivo, dos desvios de atendimento às restrições de meta.

Moraes (2005) tratou o problema de blendagem de produtos de minério de ferro, estocados nos pátios da mina Cauê, da empresa Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), em Minas Gerais, visando a composição de lotes. É proposto um modelo de programação linear por metas que visa determinar os locais de retomada do produto estocado, de tal forma que a mistura atenda aos limites de especificações de qualidade e quantidade preestabelecidos pelo cliente e satisfaça as restrições operacionais do pátio. O modelo de programação matemática desenvolvido foi implementado no modelador e otimizador LINGO 9.0, interfaceando com planilhas do EXCEL 2000, o que possibilitou a utilização e exportação de dados em um ambiente familiar à empresa de mineração. O sistema desenvolvido foi validado comparando-se os resultados obtidos com os produzidos manualmente pela empresa. Os resultados computacionais apresentados comprovaram que é possível prover uma melhora na composição dos lotes através do modelo proposto.

Muitos problemas de mineração, como o de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões, em geral, somente podem ser resolvidos na otimalidade, com o uso de métodos de programação matemática, quando o número de variáveis do modelo é pequeno. Isto se deve ao fato de que este problema é de natureza combinatória, pertencente à classe NP-difícil (COSTA, 2005). Assim, a utilização de métodos de programação matemática para resolver problemas deste tipo não é indicada para a maioria dos casos reais, que envolvem um número elevado de variáveis. Além do mais, nestas situações, métodos de programação matemática podem não encontrar soluções viáveis em tempos computacionais aceitáveis. Uma alternativa comumente adotada para resolução de problemas combinatórios é a utilização de heurísticas. Estas técnicas não garantem a otimalidade da solução produzida para o problema; no entanto, produzem resultados muito bons a um custo computacional baixo devido à sua fácil implementação e a uma maior flexibilidade na modelagem das restrições em comparação aos métodos exatos. Assim, vêm conquistando cada vez mais espaço na resolução de problemas de planejamento de produção em mineração.

Ezawa e Silva (1995), apud Rodrigues (2006), desenvolveram um sistema de alocação dinâmica de caminhões às frentes de lavra com o objetivo de reduzir a variabilidade dos teores do minério e aumentar a produtividade do sistema de

transporte. O sistema utiliza uma heurística para gerar as decisões que têm como resultado um seqüenciamento de caminhões que minimiza a variação dos teores. Para validar esse modelo foi utilizado simulação e para o modelamento matemático da mina a teoria dos grafos. Com a implantação do sistema, foi obtido um aumento de 8% na produtividade do sistema de transporte e o gerenciamento passou a ter em mãos dados mais precisos e em tempo real.

Alvarenga (1997) desenvolveu um programa para o despacho ótimo de caminhões em uma mineração de ferro, a céu aberto, com o objetivo de minimizar o tempo de filas para as frotas de caminhões, aumentar a produtividade da frota e melhorar a qualidade do minério lavrado com relação ao atendimento da qualidade requerida. No trabalho desenvolvido, que é base do sistema SMART MINE, foi aplicada uma técnica estocástica de otimização, o algoritmo genético com processamento paralelo, em um caso real da Mineração Casa de Pedra, uma empresa do grupo CSN – Companhia Siderúrgica Nacional. O problema se resume em sugerir qual o ponto de basculamento ou carregamento ideal e a trajetória para o deslocamento, no momento em que há uma situação de escolha a ser realizada. Enquanto os ganhos com a qualidade foram mais difíceis de serem quantificados, os resultados numéricos mostraram ganhos de 5% a 15% de produtividade, comprovando a validade da proposta.

Costa (2005) aborda problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. São apresentados e modelados problemas relativos à mistura de minérios provenientes de várias frentes de lavra, levando-se em consideração metas de produção e qualidade, restrições operacionais e a alocação dos equipamentos de carga e transporte necessários ao processo. São considerados três problemas: mistura de minérios, mistura de minérios com alocação dinâmica de caminhões e mistura de minérios com alocação estática de caminhões. Cada problema é resolvido por duas metodologias, uma baseada em técnicas de programação matemática e outra em técnicas heurísticas. Observa-se que o modelo de programação matemática, no entanto, não considera taxa de utilização de caminhões. Dada a NP-completude do problema de mistura de minérios com alocação dinâmica e/ou estática de caminhões, foi utilizada a metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS), a qual permite escapar de ótimos locais ainda distantes do ótimo global. Para explorar o espaço de soluções, o autor utiliza seis tipos de

movimentos: a) realocar equipamentos de carga; b) retomar ou parar a operação em uma frente; c) acrescentar ou diminuir o número de viagens de um caminhão em uma frente; d) realocar o número de viagens de um caminhão em frentes diferentes; e) realocar o número de viagens realizadas em uma frente para caminhões diferentes; f) retomar ou parar a operação de um caminhão em uma frente. Experimentos computacionais realizados com dados reais e instâncias hipotéticas baseadas nesses dados validam os modelos propostos. Pelos experimentos realizados, o modelo heurístico é capaz de gerar soluções de melhor qualidade em um menor tempo de processamento que aquelas obtidas pelo modelo de programação matemática.

Rodrigues (2006) fez uma análise comparativa de várias metodologias utilizadas para o despacho de caminhões em minas a céu aberto. As metodologias testadas, baseadas em Programação Linear, Programação Dinâmica e em Heurísticas, são aquelas consideradas as bases de algoritmos utilizados em sistemas de despacho comercializados no Brasil. As soluções finais geradas por essas metodologias foram simuladas usando-se o ambiente ARENA, com o objetivo de reproduzir o comportamento das operações de lavra. Os resultados obtidos mostraram o desempenho dos algoritmos utilizando as metodologias sob diferentes condições em minas a céu aberto. A autora, porém, afirma que não se pode, através dos resultados obtidos, concluir pela superioridade de uma delas.

A seguir, é feita uma revisão da programação linear por metas, do método de Costa *et al.* (2004), bem como das heurísticas utilizadas neste trabalho.

3.2 Programação por Metas

Programação por metas (*Goal Programming*) é um método para se resolver um problema de otimização multiobjetivo.

Segundo Arenales *et al* (2007), a programação por metas estabelece *a priori* um conjunto de valores (metas) aceitáveis para cada função objetivo, para encontrar uma solução de compromisso entre os objetivos conflitantes.

Considere o seguinte problema de otimização linear multiobjetivo (por simplicidade, serão considerados três objetivos):

$$\text{Maximizar } f_1(x) = c^T x$$

$$\text{Minimizar } f_2(x) = d^T x$$

$$\text{Minimizar } f_3(x) = e^T x$$

$$Ax = b$$

$$x \geq 0,$$

ou seja, 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. Supõe-se que o decisor (pessoa responsável pela implementação da solução) fique satisfeito com qualquer solução que atenda:

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

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

$$f_3(x) = \sigma_3, \text{ sendo } \sigma_3 \text{ o valor ideal para } f_3(x),$$

Nas relações acima, σ_i são chamadas *metas*. As desigualdades e a igualdade anteriores são definidas pelo decisor. Desta forma, o problema de otimização linear é reformulado como um problema de encontrar uma solução factível para o sistema:

$$f_1(x) \geq \sigma_1$$

$$f_2(x) \leq \sigma_2$$

$$f_3(x) = \sigma_3$$

$$Ax = b$$

$$x \geq 0.$$

Tal problema, entretanto, pode ser infactível, indicando que o decisor deve abrir mão de uma ou mais metas. Supõe-se que as restrições originais do problema $Ax = b$, $x \geq 0$, gerem soluções factíveis, caso contrário o problema multiobjetivo não tem qualquer solução. Para formalizar essa flexibilização das restrições-meta, são introduzidas novas variáveis nas restrições-meta:

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

$$f_2(x) - y_2 \leq \sigma_2$$

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

em que $y_1 \geq 0$, $y_2 \geq 0$, $y_3^+ \geq 0$, $y_3^- \geq 0$. Tais variáveis são chamadas variáveis de desvio porque representam os desvios acima ou abaixo dos valores das metas. Por exemplo, se uma solução factível 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.

Dois métodos são comumente utilizados para otimizar um modelo de programação de metas: (i) o *método dos pesos* e (ii) o *método hierárquico* (em inglês, *preemptive*). Ambos baseiam-se na estratégia de converter múltiplos objetivos em um único objetivo. 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 próximo possível de zero. Portanto, o seguinte problema deve ser resolvido:

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

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

$$f_2(x) - y_2 \leq \sigma_2$$

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

$$Ax = b$$

$$x \geq 0, y_1 \geq 0, y_2 \geq 0, y_3^+ \geq 0, y_3^- \geq 0,$$

em que $w_1 + w_2 + w_3$ são os pesos (positivos) das metas, respectivamente, representando a importância relativa entre elas para o decisor. Por exemplo, 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 meta 3.

No método hierárquico, os objetivos são tomados em ordem de prioridade, um após o outro. Por exemplo, suponha 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. Então, primeiro minimiza-se o desvio y_1 do primeiro objetivo. A seguir, minimiza-se o desvio y_2 do segundo objetivo, sujeito à condição de que o desvio

do primeiro objetivo seja mínimo (isto é, o valor 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 (isto é, os valores y_1 e y_2 são fixados nos valores mínimos já obtidos anteriormente), e assim por diante.

Os métodos de programação de metas procuram uma solução que satisfaça as metas do problema sem se preocupar com a otimização do problema. Em outras palavras, se houver várias soluções que satisfaçam todas as metas, esses métodos não determinam a melhor delas do ponto de vista da otimização dos objetivos originais do problema, f_1 , f_2 , f_3 . Isso pode ser contornado adicionando-se às funções objetivos dos modelos de programação de metas, múltiplos positivos e pequenos dos objetivos originais a serem minimizados, ou subtraindo-se múltiplos positivos e pequenos, se originalmente desejava-se maximizar. Por exemplo, no método dos pesos, é conveniente considerar: minimizar $\varphi(x,y) = w_1y_1 + w_2y_2 + w_3(y_3^+ + y_3^-) - \epsilon_1f_1(x) + \epsilon_2f_2(x) + \epsilon_3f_3(x)$. A programação de 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.

3.3 O modelo de Alocação Dinâmica de Costa *et al.* (2004)

Costa *et al.* (2004) utilizou a técnica de pesquisa operacional conhecida como programação por metas (*Goal Programming*), para modelar a alocação dinâmica de caminhões no planejamento de lavra.

No modelo destes autores o objetivo é minimizar os desvios das metas de produção, bem como os desvios das metas de qualidade. O modelo, apresentado pelas equações (3.1)-(3.22), considera os seguintes 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 qualidade analisados no minério;
 C : Conjunto de equipamentos de carga;
 V : Conjunto de equipamentos de transporte;
 Pr : Ritmo de lavra recomendado (t/h);
 Pl : Ritmo de lavra mínimo (t/h);
 Pu : Ritmo de lavra máximo (t/h);
 α^- : Penalidade por desvio negativo da produção;
 α^+ : Penalidade por desvio positivo da produção;
 t_{ij} : Valor do parâmetro de qualidade j na frente i (%);
 tr_j : Valor recomendado para o parâmetro de qualidade j na mistura (%);
 tl_j : Valor mínimo admissível para o parâmetro de qualidade j na mistura (%);
 tu_j : Valor máximo admissível para o parâmetro de qualidade j na mistura (%);
 β^- : Penalidade por desvio negativo para o parâmetro de qualidade j na mistura;
 β^+ : Penalidade por desvio positivo para o parâmetro de qualidade j na mistura;
 Ql_i : Ritmo de lavra mínimo para a frente i (t/h);
 Qu_i : Ritmo de lavra máximo para a frente i (t/h);
 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);
 cap_l : Capacidade do caminhão l (t);
 tc_{il} : Tempo total de ciclo do caminhão l na frente i (min);
 $g_{lk} = \begin{cases} 1 & \text{se o caminhão } l \text{ é compatível com o equipamento de carga } k, \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

e as seguintes 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 na frente i em uma hora;

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

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

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

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

O modelo de programação matemática relativo à alocação dinâmica de uma frota heterogênea de caminhões e equipamentos de carga, levando-se em consideração metas de produção e qualidade de minério, é apresentado pelas equações (3.1)-(3.22).

$$\min \sum_{j \in T} \beta_j^- d_j^- + \sum_{j \in T} \beta_j^+ d_j^+ + \alpha^- P^- + \alpha^+ P^+ \quad 3.1$$

s.a:

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j) x_i \leq 0 \quad \forall j \in T \quad 3.2$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_j) x_i \geq 0 \quad \forall j \in T \quad 3.3$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_j) x_i + d_j^- - d_j^+ = 0 \quad \forall j \in T \quad 3.4$$

$$\sum_{i \in M} x_i \leq Pu \quad 3.5$$

$$\sum_{i \in M} x_i \geq Pl \quad 3.6$$

$$\sum_{i \in M} x_i + P^- - P^+ = Pr \quad 3.7$$

$$x_i \leq Qu_i \quad \forall i \in F \quad 3.8$$

$$x_i \geq Ql_i \quad \forall i \in F \quad 3.9$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad 3.10$$

$$d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \forall j \in T \quad 3.11$$

$$P^+, P^- \geq 0 \quad 3.12$$

$$\sum_{i \in E} x_i - rem \sum_{i \in M} x_i \geq 0 \quad 3.13$$

$$\sum_{k \in C} y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in F \quad 3.14$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \in C \quad 3.15$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in F, k \in C \quad 3.16$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cu_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F \quad 3.17$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cl_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in F \quad 3.18$$

$$n_{il} tc_{il} - 60 \sum_{k \in C, g_{ik} \neq 0} y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F, l \in V \quad 3.19$$

$$\sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \leq 60 \quad \forall l \in V \quad 3.20$$

$$x_i - \sum_{l \in V} n_{il} cap_l = 0 \quad \forall i \in F \quad 3.21$$

$$n_{il} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in F, l \in V \quad 3.22$$

Observa-se que (3.2)-(3.12) são restrições que juntamente com a função objetivo (3.1) formam o modelo de mistura de minérios com metas. A restrição (3.13) diz respeito ao atendimento da relação estéril/minério mínima requerida. As demais restrições que complementam o modelo podem ser divididas em dois grupos. O primeiro diz respeito à alocação de equipamentos de carga e a faixa de produtividade que torne viável a utilização desses equipamentos. O conjunto de restrições (3.14) define que à cada frente deve ser alocado, no máximo, um único equipamento de carga, enquanto que as restrições (3.15) definem que cada equipamento de carga opera em uma única frente. As restrições (3.16) definem que as variáveis y_{ik} são binárias. As restrições (3.17) e (3.18) limitam, respectivamente, o ritmo de lavra máximo e mínimo.

O segundo grupo de restrições está relacionado ao transporte de material na mina e a alocação dos caminhões. Cada restrição (3.19) faz com que um caminhão somente realize viagens a uma frente onde esteja alocado um equipamento de carga compatível. As restrições (3.20) definem que cada caminhão opere no máximo sessenta minutos. As restrições (3.21) fazem com que o ritmo de lavra de uma frente seja igual à produção realizada pelos caminhões alocados à frente. As restrições (3.22) determinam que o número de viagens que um caminhão faz à uma frente é um valor inteiro positivo.

3.4 Heurísticas

3.4.1 Introdução

Muitos problemas práticos são classificados na literatura como NP-completos ou NP-difíceis, isto é, são problemas para os quais ainda não existem algoritmos que os resolvam em tempo polinomial. Um exemplo clássico é o conhecido Problema do Caixeiro Viajante (PCV). O PCV é descrito por um conjunto de n cidades e uma matriz de distância entre elas, tendo o seguinte objetivo: o caixeiro viajante deve sair de uma cidade chamada origem, visitar cada uma das cidades restantes $(n-1)$ apenas uma única vez e retornar à cidade origem percorrendo a menor distância possível. Em outras palavras, deve ser encontrado um ciclo hamiltoniano (ciclo fechado) de comprimento mínimo que passe exatamente uma única vez por cada cidade.

No PCV simétrico, situação na qual a distância da cidade i para a cidade j é igual à distância da cidade j para a cidade i , há $(n-1)!/2$ rotas possíveis para serem analisadas. Neste problema, o uso de métodos de programação matemática, dito exatos, se torna bastante restrito, uma vez que demandam tempos proibitivos para encontrar a melhor solução ou mesmo uma solução viável para valores elevados de n . Por outro lado, na prática, em geral, é suficiente encontrar uma “boa” solução para o problema, ao invés do ótimo global, o qual, às vezes, somente pode ser encontrado após um considerável esforço computacional.

Este é o motivo pelo qual os pesquisadores têm concentrado esforços na utilização de outros procedimentos para solucionar problemas desse nível de

complexidade. Dentre esses procedimentos, destacam-se as heurísticas. Uma heurística pode ser definida como uma técnica, normalmente inspirada em processos intuitivos, que procura uma boa solução a um custo computacional aceitável, sem, no entanto, estar capacitada a garantir sua otimalidade, bem como garantir quão próximo se está da solução ótima. O desafio é produzir, em tempo mínimo, soluções tão próximas quanto possíveis da solução ótima.

As heurísticas podem ser construtivas ou de refinamento. No primeiro caso, o objetivo é construir uma solução, elemento por elemento, adicionando-se a cada passo, um único elemento, normalmente aquele que tem o valor mais favorável da função guiadora da construção. Já as heurísticas de refinamento consistem em melhorar uma solução por meio de modificações realizadas nesta. Nas heurísticas clássicas, apenas as modificações que produzirem os melhores resultados são aceitos, sendo os métodos interrompidos quando se alcança o primeiro ótimo local.

Como exemplos clássicos de heurísticas convencionais têm-se o Método da Descida e o Método Randômico de Descida, a seguir apresentados.

3.4.1.1 Método da Descida/Subida (Descent/Uphill Method)

A idéia desta técnica é partir de uma solução inicial qualquer e a cada passo analisar todos os seus possíveis vizinhos, movendo somente para aquele que representar uma melhora no valor atual da função de avaliação. Dessa forma, o método pára quando um ótimo local é encontrado. A Figura 3.1 mostra o pseudocódigo do Método de Descida aplicado à minimização de uma função de avaliação f a partir de uma conhecida solução inicial s e considerando a busca em uma dada vizinhança $N(.)$.

```

procedimento Descida( $f(.), N(.), s$ );
1.       $V = \{s' \in N(s) \mid f(s') < f(s)\};$ 
2.      enquanto ( $|V| > 0$ ) faça
3.          Selecione  $s' \in V$ , onde  $s' = \arg \min\{f(s') \mid s' \in V\};$ 
4.           $s \leftarrow s'$ ;
5.           $V = \{s' \in N(s) \mid f(s') < f(s)\};$ 
6.      fim-enquanto;
7.      Retorne  $s$ ;
fim Descida;

```

Figura 3.1 – Método da Descida

3.4.1.2 Método Randômico de Descida

O Método de Descida/Subida requer a exploração de toda a vizinhança. Outro método alternativo, que evita essa pesquisa exaustiva é o Método Randômico de Descida/Subida (*Random Descent/Uphill Method*). Ele consiste em analisar um vizinho qualquer e o aceitar somente se ele for estritamente melhor que a solução corrente; não o sendo, a solução corrente permanece inalterada e outro vizinho é gerado. O procedimento é interrompido após um número fixo de iterações sem melhora no valor da melhor solução obtida até então. O método Randômico de Descida/Subida também fica preso no primeiro ótimo local encontrado (SOUZA, 2007).

Na Figura 3.2 mostra-se o pseudocódigo do Método Randômico de Descida aplicado ao refinamento de uma solução s em um problema de minimização de uma função $f(\cdot)$, utilizando uma estrutura de vizinhança $N(\cdot)$. Nessa figura, $IterMax$ representa o número máximo de iterações sem melhora no valor da função de avaliação.

```
procedimento RandomicoDescida( $f(\cdot), N(\cdot), IterMax, s$ );  
1.       $Iter = 0$ ; {Contador de iterações sem melhora }  
2.      enquanto ( $Iter < IterMax$ ) faça  
3.           $Iter \leftarrow Iter + 1$ ;  
4.          Selecione aleatoriamente  $s' \in N(s)$ ;  
5.          se ( $f(s') < f(s)$ ) então  
6.               $Iter = 0$ ;  
7.               $s \leftarrow s'$ ;  
8.          fim-se;  
9.      fim-enquanto;  
10.     Retorne  $s$ ;  
fim RandomicoDescida;
```

Figura 3.2 – Método Randômico de Descida

3.4.2 Metaheurísticas

A maioria das heurísticas desenvolvidas é muito específica para um problema particular, não sendo eficientes (ou mesmo aplicáveis) na resolução de uma classe mais ampla de problemas.

Somente a partir da década de 1980 intensificaram-se os estudos no sentido de se desenvolver procedimentos heurísticos com uma certa estrutura teórica e com caráter mais geral, sem prejudicar a principal característica destes, que é a flexibilidade.

Esta meta tornou-se mais realista a partir da reunião de conceitos das áreas de Otimização e Inteligência Artificial, viabilizando a construção das chamadas “melhores estratégias” ou dos métodos “inteligentemente flexíveis”, comumente conhecidos como “metaheurísticas”.

As metaheurísticas são procedimentos destinados a encontrar uma boa solução, eventualmente a ótima, consistindo na aplicação, em cada passo, de uma heurística subordinada, a qual tem que ser modelada para cada problema específico. Contrariamente às heurísticas convencionais, as metaheurísticas são de caráter geral e têm condições de escapar de ótimos locais (SOUZA, 2007).

Dentre os procedimentos enquadrados como metaheurísticas que surgiram ao longo das últimas décadas, destacam-se: Algoritmos Genéticos (AGs), Redes Neurais, *Simulated Annealing* (SA), Busca Tabu (BT), GRASP, VND, VNS, ILS, Colônia de Formigas etc.

3.4.2.1 Iterated Local Search

O método *Iterated Local Search* (ILS) é baseado na idéia de que um procedimento de busca local pode ser melhorado gerando-se novas soluções de partida, as quais são obtidas por meio de perturbações na solução ótima local. A perturbação precisa ser suficientemente forte para permitir que a busca local explore diferentes soluções, mas também fraca o suficiente para evitar um reinício aleatório (LOURENÇO *et al.*, 2003).

O método ILS é, portanto, um método de busca local que procura focar a busca não no espaço completo de soluções, mas em um pequeno subespaço definido por soluções que são ótimas locais de determinado procedimento de otimização (LOURENÇO *et al.*, 2003).

Para aplicar um algoritmo *ILS*, quatro componentes têm que ser especificadas: (a) Procedimento *GeraSolucaoInicial()*, que gera uma solução inicial s' para o problema; (b) Procedimento *BuscaLocal*, que retorna a melhor solução s'' de uma dada vizinhança; (c) Procedimento *Perturbação*, que modifica a solução corrente s guiando a uma solução intermediária s' e (d) Procedimento *CritérioAceitação*, que decide de qual solução a próxima perturbação será aplicada.

A Figura 3.3 ilustra o pseudocódigo do algoritmo *ILS* básico.

<u>Procedimento</u> <i>ILS()</i>	
1.	$s_0 \leftarrow \text{GeraSolucaoInicial}();$
2.	$s \leftarrow \text{BuscaLocal}(s_0);$
3.	$\text{iter} \leftarrow 0;$
4.	<u>enquanto</u> ($\text{iter} < \text{iter}_{\max}$)
5.	$\text{iter} \leftarrow \text{iter} + 1;$
6.	$s' \leftarrow \text{Perturbação}(\text{nível}, s);$
7.	$s'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(s');$
8.	$s \leftarrow \text{CritérioAceitação}(s'');$
9.	<u>fim-enquanto;</u>
10.	<u>retorne</u> $s;$
<u>fim</u> <i>ILS;</i>	

Figura 3.3 – Pseudocódigo para o procedimento *ILS*

De acordo com Lourenço *et al.* (2003), o sucesso do *ILS* é centrado no conjunto de amostragem de ótimos locais, juntamente com a escolha do método de busca local, das perturbações e do critério de aceitação. Em princípio, qualquer método de busca local pode ser usado, mas o desempenho do *ILS* com respeito à qualidade da solução final e a velocidade de convergência depende fortemente do método escolhido. Normalmente um método de descida é usado, mas também é possível aplicar algoritmos mais sofisticados, tais como Busca Tabu ou outras metaheurísticas.

O mecanismo de perturbação deve ser forte o suficiente para permitir escapar do ótimo local corrente e permitir explorar diferentes regiões do espaço de soluções. Ao mesmo tempo, a modificação precisa ser fraca o suficiente para guardar características do ótimo local corrente.

O critério de aceitação é usado para decidir de qual solução se continuará a exploração, bem como qual será a perturbação a ser aplicada. Um aspecto importante do

critério de aceitação e da perturbação é que eles induzem aos procedimentos de intensificação e diversificação. A intensificação consiste em permanecer na região do espaço onde a busca se encontra, procurando explorá-la de forma mais efetiva; enquanto a diversificação consiste em se deslocar para outras regiões do espaço de soluções.

A intensificação da busca ao redor da melhor solução encontrada é obtida, por exemplo, pela aplicação de “pequenas” perturbações sobre ela. A diversificação, por sua vez, pode ser realizada aceitando-se quaisquer soluções s e aplicando-se “grandes” perturbações na solução ótima local.

3.4.2.2 Método de Descida em Vizinhança Variável

O Método de Descida em Vizinhança Variável (*Variable Neighborhood Descent*, VND), de acordo com Mladenovic e Hansen (1997), é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança, aceitando somente soluções de melhora da solução corrente e retornando à primeira estrutura quando uma solução melhor é encontrada. Apresenta-se, a seguir, o pseudocódigo desse algoritmo para um problema de minimização.

- 1) Seja r o número de estruturas de vizinhança distintas
 - 2) $s \leftarrow s_0$, onde s_0 é a solução inicial e s é a solução corrente
 - 3) $k \leftarrow 1$, onde k é a estrutura de vizinhança corrente
 - 4) enquanto $(k \leq r)$ faça
 - a) encontre o melhor vizinho $s' \in N^k(s)$, onde k é a k -ésima estrutura de vizinhança
 - b) se $f(s') < f(s)$, então $s \leftarrow s'$ e $k \leftarrow 1$
 - c) caso contrário, $k \leftarrow k + 1$
 - 5) retorne a solução s

Figura 3.4 – Pseudocódigo do algoritmo VND

4. Modelagem do Problema Abordado

4.1 Introdução

Para resolver o problema de planejamento de lavra com alocação dinâmica de caminhões, são apresentados dois modelos: um de programação matemática e outro heurístico. Dada sua complexidade combinatória, uma vez que o mesmo se reduz ao problema da mochila múltipla, o qual é NP-difícil (COSTA, 2005), o primeiro modelo servirá para validar o segundo e será aplicado a instâncias de pequeno porte. Para problemas de porte mais elevado, o primeiro modelo, em geral, não é capaz de resolvê-los na otimalidade, em virtude do tempo proibitivo de execução.

4.2 Modelo de Programação Matemática

Para a modelagem exata desse problema, será utilizada a técnica de pesquisa operacional conhecida como programação por metas (*Goal Programming*), descrita na Seção 3.2.

O modelo proposto de alocação dinâmica de caminhões é uma adaptação daquele de Costa *et al.* (2004). Especificamente, a equação referente à relação estéril/minério é substituída por uma equação de meta de produção de estéril. Esta substituição é feita apenas para clareza de entendimento. Assim são criadas variáveis de desvio relativas ao não atendimento desta meta. Adicionalmente são incluídas restrições relativas às taxas de utilização dos veículos de transporte, bem como uma componente de avaliação do número de veículos usados.

Tal como em Costa *et al.* (2004), o planejamento da produção é feito para uma hora, sendo replicado enquanto não houver frente exaurida e as condições operacionais forem as mesmas.

O objetivo do modelo é minimizar os desvios das metas de produção e qualidade, bem como reduzir o número de veículos necessários à operação.

Para a apresentação do modelo, sejam os seguintes parâmetros 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 controle¹ analisados no minério;

C : Conjunto de equipamentos de carga;

V : Conjunto de equipamentos de transporte;

Pr : Ritmo de lavra recomendado relativo a minério (t/h);

Pl : Ritmo de lavra mínimo relativo a minério (t/h);

Pu : Ritmo de lavra máximo relativo a minério (t/h);

Er : Ritmo de lavra recomendado relativo a estéril (t/h);

α^- : Penalidade por desvio negativo da produção de minério;

α^+ : Penalidade por desvio positivo da produção de minério;

γ^- : Penalidade por desvio negativo da produção de estéril;

γ^+ : 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 (%);

β^- : Penalidade por desvio negativo para o parâmetro de controle j na mistura;

β^+ : Penalidade por desvio positivo para o parâmetro de controle j na mistura;

Qu_i : Ritmo de lavra máximo para a frente i (t/h);

¹ Teores de Fe, Al₂O₃ etc e granulometria. A granulometria ou análise granulométrica dos solos é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanhos de grãos, a percentagem em peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise (<http://wikipedia.org/wiki/granulometria>, acessado em junho de 2008)

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);

ω_l : Peso associado à importância da utilização do caminhão l ;

$TxMax_l$: Taxa máxima de utilização admitida para o caminhão l ;

$$g_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o caminhão } l \text{ é compatível com o equipamento de carga } k, \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

e as seguintes 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 na frente i 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 estéril em relação ao recomendado (t/h).

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

A seguir, é apresentado pelas equações (4.1)-(4.24) o modelo de programação matemática relativo à alocação dinâmica de uma frota heterogênea de caminhões e equipamentos de carga, levando-se em consideração metas de produção e qualidade de minério.

$$\min \sum_{j \in T} \beta_j^- d_j^- + \sum_{j \in T} \beta_j^+ d_j^+ + \alpha^- P^- + \alpha^+ P^+ + \gamma^- Pe^- + \gamma^+ Pe^+ + \sum_{l \in V} \omega_l usou_l \quad 4.1$$

s.a:

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tu_j) x_i \leq 0 \quad \forall j \in T \quad 4.2$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tl_j) x_i \geq 0 \quad \forall j \in T \quad 4.3$$

$$\sum_{i \in M} (t_{ij} - tr_j) x_i + d_j^- - d_j^+ = 0 \quad \forall j \in T \quad 4.4$$

$$\sum_{i \in M} x_i \leq Pu \quad 4.5$$

$$\sum_{i \in M} x_i \geq Pl \quad 4.6$$

$$\sum_{i \in M} x_i + P^- - P^+ = Pr \quad 4.7$$

$$\sum_{i \in E} x_i + Pe^- - Pe^+ = Er \quad 4.8$$

$$x_i \leq Qu_i \quad \forall i \in F \quad 4.9$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in F \quad 4.10$$

$$d_j^+, d_j^- \geq 0 \quad \forall j \in T \quad 4.11$$

$$P^+, P^- \geq 0 \quad 4.12$$

$$Pe^+, Pe^- \geq 0 \quad 4.13$$

$$\sum_{k \in C} y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in F \quad 4.14$$

$$\sum_{i \in F} y_{ik} \leq 1 \quad \forall k \in C \quad 4.15$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in F, k \in C \quad 4.16$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cu_k y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F \quad 4.17$$

$$x_i - \sum_{k \in C} Cl_k y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in F \quad 4.18$$

$$n_{il} tc_{il} - 60 \sum_{k \in C, g_{ik} \neq 0} y_{ik} \leq 0 \quad \forall i \in F, l \in V \quad 4.19$$

$$\frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \leq TxMax_l \quad \forall l \in V \quad 4.20$$

$$x_i - \sum_{l \in V} n_{il} cap_l = 0 \quad \forall i \in F \quad 4.21$$

$$usou_l \geq \frac{1}{60} \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \quad \forall l \in V \quad 4.22$$

$$n_{il} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in F, l \in V \quad 4.23$$

$$usou_l \in \{0,1\} \quad l \in V \quad 4.24$$

O modelo de mistura de minérios com metas é formado pelas restrições (4.2)-(4.13) e pela função objetivo (4.1). As restrições (4.7) e (4.8) 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. O primeiro diz respeito à alocação de equipamentos de carga e a faixa de produtividade que torne viável a utilização desses equipamentos. O segundo grupo de restrições está relacionado ao transporte de material na mina e a alocação e utilização dos caminhões.

Em relação ao primeiro grupo de restrições, o conjunto (4.14) define que em cada frente pode ser alocado, no máximo, um único equipamento de carga, enquanto que as restrições (4.15) definem que cada equipamento de carga pode operar, no máximo, em uma única frente. As restrições (4.16) definem que as variáveis y_{ik} são binárias. As restrições (4.17) e (4.18) limitam, respectivamente, o ritmo de lavra máximo e mínimo, definido pela carregadeira alocada à frente. Já as restrições (4.9) limitam o ritmo de lavra máximo definido pelo usuário.

No segundo grupo de restrições, que está relacionado ao transporte de material na mina e a alocação e utilização dos caminhões, cada restrição (4.19) faz com que um caminhão somente realize viagens à uma frente onde esteja alocado um equipamento de carga compatível. As restrições (4.20) definem que cada caminhão opere no máximo $TxMax_l\%$ em uma hora. As restrições (4.21) fazem com que o ritmo de lavra de uma frente seja igual à produção realizada pelos caminhões alocados à frente. As restrições (4.22), juntamente com a função objetivo, forçam com que os caminhões usados sejam penalizados. As restrições (4.23) determinam que o número de viagens que um

caminhão faz a uma frente é um valor inteiro positivo. As restrições (4.24) indicam que as variáveis $usou_l$ são binárias.

4.3 Modelo Heurístico

4.3.1 Dados de Entrada

Sejam: F o conjunto de frentes, V o conjunto de veículos, C o conjunto de equipamentos de carga, T o conjunto dos parâmetros de controle (teores de Fe, Al_2O_3 e etc e granulometria) presentes nas frentes, qu_i a quantidade máxima de massa lavrável em cada frente i , tc_{il} o tempo de ciclo de cada veículo l a cada frente i , t_{ij} o percentual do parâmetro de controle j presente na frente i , $Compatib_{|C| \times |V|}$ a matriz que representa a compatibilidade entre os equipamentos de carga k e os caminhões l , cap_l a capacidade de cada caminhão l , Cl_k a capacidade mínima de cada carregadeira k e Cu_k a capacidade máxima de cada carregadeira k e $TxMax_l$ a taxa de utilização máxima permitida para o l -ésimo caminhão.

Descreve-se, a seguir, a representação de uma solução para o problema, a função de avaliação de uma solução, os movimentos e as técnicas heurísticas utilizadas na exploração do espaço de soluções do problema.

4.3.2 Representação de uma Solução

Uma solução é representada por uma matriz $R_{|F| \times (1+V)}$ formada pelas matrizes $Y_{|F| \times 1}$ e $N_{|F| \times |V|}$, em que:

y_{ik} : representa a alocação do equipamento de carga k à frente i , observando-se o estado ativo ou inativo de cada equipamento;

n_{il} : representa o número de viagens do caminhão l à frente i .

$$R_{|F| \times (1+V)} = [Y_{|F| \times 1} \mid N_{|F| \times |V|}] \quad 4.25$$

A partir de Y , N e os tempos de ciclo da matriz $T_{C_{|F| \times |V|}}$ são determinados $S_{|F| \times 1}$ e $T_{cv_{1 \times |V|}}$, os quais representam, respectivamente, a quantidade de massa lavrada em cada frente e o somatório dos tempos de ciclo de cada veículo.

A Figura 4.1 exemplifica uma solução para uma instância do problema, considerando $|F|$ frentes e $|V|$ caminhões. As linhas representam as frentes de lavra (F). A coluna *Carreg* ($Y_{|F| \times 1}$) representa a alocação das carregadeiras às frentes. As outras colunas ($N_{|F| \times |V|}$) representam as viagens realizadas pelos caminhões (Cam) em cada frente.

	Y	N			
	<i>Carreg</i>	Cam_1	Cam_2	...	$Cam_{ V }$
F_1	(5 , 1)	5	0	...	2
F_2	(3 , 0)	-1	-1	...	0
F_3	(-1 , 0)	0	0	...	-1
F_4	(6 , 1)	7	-1	...	0
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
$F_{ F }$	(2 , 1)	4	0	...	1

Figura 4.1 – Representação de uma Solução

Cada célula da matriz $Y_{|F| \times 1}$ é composta de duas informações: a primeira diz respeito ao número da carregadeira k alocada à frente i . O valor -1 significa que não existe carregadeira alocada. A segunda informação diz se a carregadeira está ativa (1) ou não (0).

Na matriz $N_{|F| \times |V|}$, cada célula é composta do número de viagens de um caminhão l a uma frente i . O valor 0 (zero) significa que não há nenhuma viagem para aquele

caminhão. O valor -1 informa a incompatibilidade entre o caminhão e a carregadeira alocados àquela frente.

Exemplificando, a linha 1 diz respeito à frente F_1 onde está alocada a carregadeira de número 5 que se encontra ativa (5 , 1). Já na frente F_2 , a carregadeira 3 está alocada, mas não se encontra em operação no momento (3 , 0). Entretanto, na frente F_3 não existe carregadeira alocada no momento (-1 , 0). Em relação à matriz $N_{|F| \times |V|}$, que se refere ao número de viagens de um caminhão l a uma determinada frente i , a linha 4 mostra que o caminhão Cam_1 realizará 7 viagens à frente F_4 , o caminhão Cam_2 é incompatível com a carregadeira de número 6 alocada à frente e o caminhão $Cam_{|V|}$ não fará nenhuma viagem à esta frente.

4.3.3 Geração de uma Solução Inicial

Para se gerar a solução inicial é necessário se construir as matrizes $Y_{|F| \times 1}$, $N_{|F| \times |V|}$, $S_{|F| \times 1}$ e $Tcv_{1 \times |V|}$.

A Figura 4.2 mostra o pseudocódigo da geração da matriz Y (alocação das carregadeiras). Inicialmente, atribui-se o valor -1 para todas as carregadeiras, ou seja, considera-se que não existe carregadeira alocada a nenhuma frente. Atribui-se, também, o valor 0 (zero) para o *status* de cada carregadeira informando a inatividade de cada uma delas em cada frente. Em seguida, as carregadeiras são alocadas aleatoriamente a cada uma das frentes disponíveis. Para estas carregadeiras, atribui-se o *status* ‘ativo’ (1), inicialmente.

```

Procedimento Gera_Carreg( Y );
  Variáveis  $i, k$ : inteiro;
  Início
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncarreg  $\leftarrow$  n° total de carregadeiras;
    Para  $i \leftarrow 1$  até maxFr
       $y[i].n\_carr \leftarrow -1$ ; {número da carregadeira}
       $y[i].n\_ativo \leftarrow 0$ ; {status da carregadeira}
    Fim para
    Para  $k \leftarrow 1$  até Ncarreg
      Repita
         $i \leftarrow \text{aleatório}(\text{maxFr})$ ;
        se  $y[i].n\_carr = -1$  {não existe carregadeira alocada}
           $y[i].n\_carr \leftarrow k$ ;
           $y[i].n\_ativo \leftarrow 1$ ;
        até  $y[i].n\_car \neq -1$ 
      Fim para
    Fim{ Gera_Carreg}

```

Figura 4.2 – Alocação Aleatória das Carregadeiras

A Figura 4.3 mostra o pseudocódigo da geração da matriz $N_{|F| \times |V|}$ (número de viagens de cada caminhão l às diversas frentes i). O número de viagens em cada célula da matriz $N_{|F| \times |V|}$ é gerado aleatoriamente. Para cada célula n_{il} é verificado inicialmente o número máximo (nv_max) de viagens, por hora, em função do tempo de ciclo (T_c) de cada caminhão l às diversas frentes i . É gerado, então, de forma aleatória, um número compreendido entre 0 e o número máximo de viagens (nv_max). Posteriormente, é verificado se existe carregadeira alocada a essa frente. Se existir, verifica-se se há compatibilidade entre a carregadeira k e o caminhão alocado l . Caso afirmativo, verifica-se se a carregadeira k alocada à frente i encontra-se ativa ou não. Estando ativa, considera-se o número aleatório calculado anteriormente como sendo o número de viagens do caminhão l à frente i . Não estando ativa ou não havendo compatibilidade entre a carregadeira e o caminhão ou, ainda, não havendo carregadeira alocada à frente, não é atribuído a esse caminhão nenhuma viagem nesta frente. O procedimento é repetido para todas as células da matriz $N_{|F| \times |V|}$.

```

Procedimento Gera_Viagens( N );
  Variáveis  $i, l, nv, nv\_max$ : inteiro;
  Início
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
    Para  $i \leftarrow 1$  até MaxFr
      Para  $l \leftarrow 1$  até Ncam
         $nv\_max \leftarrow \text{int}(60/Tc[i, l]);$ 
         $nv \leftarrow \text{aleatório}(nv\_max);$ 
        se carregadeira_alocada
          se houver_compatib_Carreg_Cam
            se carregadeira_ativa
               $n[i, l] \leftarrow nv;$ 
      Fim para
    Fim para
  Fim{ Gera_Viagens}

```

Figura 4.3 – Número de Viagens de cada Caminhão às diversas Frentes

A Figura 4.4 mostra o pseudocódigo da geração da matriz $S_{|F| \times 1}$ (quantidade de massa lavrável em cada frente). A quantidade de massa lavrável (s_i) em cada frente é gerada da seguinte forma: para cada frente i , é gerado s_i como sendo o somatório dos produtos das matrizes $N_{|F| \times |V|}$ e $Cap_{|V|}$, ou seja, entre o número de viagens (n_{il}) e a capacidade de cada caminhão (cap_l).

```

Procedimento Gera_Massa_Lavrável( S, N, Cap );
  Variáveis  $i, l$ : inteiro;
  Início
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
    Para  $i \leftarrow 1$  até MaxFr
      Para  $l \leftarrow 1$  até Ncam
        Se  $n[i, l] > 0$ 
           $s[i] \leftarrow \sum (n[i, l] * cap_l);$ 
      Fim para
    Fim para
  Fim{ Gera_Massa_Lavrável}

```

Figura 4.4 – Massa Lavrável em cada Frente

A Figura 4.5 mostra o pseudocódigo da geração da matriz $Tcv_{1 \times |V|}$ (somatório dos tempos de ciclo por caminhão). Para cada caminhão, é calculado o somatório do

produto entre o número de viagens (n_{il}) e o tempo de ciclo Tc_{il} nas diversas frentes, gerando a matriz $Tcv_{1 \times |V|}$.

```

Procedimento Gera_Tempo_Cam( Tcv, N, Tc );
  Variáveis  $i, l$ : inteiro;
  Início
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
    Para  $l \leftarrow 1$  até Ncam
      Para  $i \leftarrow 1$  até MaxFr
        Se  $n[i, l] > 0$ 
           $tcv[l] \leftarrow \sum (n[i, l] * tc[i, l]);$ 
        Fim para
      Fim para
  Fim{ Gera_Tempo_Cam}

```

Figura 4.5 – Somatório dos Tempos de Ciclo por Caminhão

Mesmo com a geração de todas essas matrizes, é conveniente verificar se existem inviabilidades na solução inicial gerada. A correção das mesmas propicia uma solução inicial de melhor qualidade diminuindo o esforço computacional exigido no refinamento dessa solução.

O procedimento verifica a existência de duas inviabilidades. A primeira diz respeito ao somatório dos tempos de ciclo por caminhão. O tempo de ciclo acumulado de cada caminhão não poderá exceder a 60 minutos. Como o objetivo é fornecer uma solução em uma hora, há a necessidade de se fazer uma correção na solução.

A Figura 4.6 mostra o pseudocódigo referente ao “Reparador de Inviabilidade do Número de Viagens” que tem como objetivo refinar o número de viagens do caminhão l à todas as frentes, fazendo com que o somatório dos tempos de ciclo seja inferior ou, no máximo, igual a 60 minutos.

O pseudocódigo da Figura 4.6 mostra que, para cada caminhão l , é verificado se o tempo de ciclo acumulado (tcv_l) é superior a 60 minutos. Caso seja, é escolhida uma frente i , aleatoriamente, e retirada uma viagem do caminhão l , caso exista. Em seguida, subtrai-se o tempo de ciclo ($tc_{i,l}$) correspondente. O procedimento é repetido, para cada caminhão, até que o tempo acumulado seja inferior ou igual a 60 minutos.

```

Procedimento Refina_N(N,Tc,Tcv);
  Variáveis  $i,l$ :inteiro;
  Início
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
    Para  $l \leftarrow 1$  até Ncam
      enquanto Tcv[l]>60
         $i \leftarrow$  aleatório(maxFr);
        Se  $n[i,l] > 1$ 
           $n[i,l] \leftarrow n[i,l]-1$ ;
           $tcv[l] \leftarrow tcv[l] - tc[i,l]$ ;
        Fim enquanto
      Fim para
  Fim{ Refina_N }

```

Figura 4.6 – Reparador de Inviabilidade do Número de Viagens

Após aplicar este reparador de inviabilidade, é necessário reconstruir a matriz $S_{|F| \times 1}$ (massa lavrável em cada frente), como mostrado na Figura 4.4.

A segunda inviabilidade diz respeito à quantidade de massa lavrável, por frente. Mesmo com a correção da primeira inviabilidade, não há garantias de que a massa lavrável, calculada através da aplicação do pseudocódigo mostrado na fig. 4.4, seja inferior à quantidade máxima lavrável (Q_u) existente em cada frente. Sendo superior, há a necessidade de se fazer a correção como explicitado no pseudocódigo mostrado na Figura 4.7. Essa correção também deverá ser realizada caso a quantidade de massa lavrável calculada seja maior que a capacidade máxima de produção da carregadeira em uma hora.

Procedimento Refina_S(S, N, Qu, Tc, Tcv, Cu, Y, Cap);

Variáveis i, l : inteiro;

Início

MaxFr $\leftarrow$ n° máximo de frentes;

Ncam $\leftarrow$ n° total de caminhões;

Para $i \leftarrow 1$ até MaxFr

Enquanto ($s[i] > qu[i]$) ou ($s[i] > cu[Y[i].N_carr]$)

$l \leftarrow \text{aleatório}(Ncam)$;

Se $n[i, l] > 0$

$n[i, l] \leftarrow n[i, l] - 1$;

$tcv[l] \leftarrow tcv[l] - tc[i, l]$;

$s[i] \leftarrow s[i] - cap[l]$;

se minério

$t \leftarrow t - cap[l]$

senão est $\leftarrow est - cap[l]$;

Fim enquanto

Fim para

Fim{ Refina_S }

Figura 4.7 – Reparador de Inviabilidade de Massa Lavrável

O pseudocódigo mostrado na Figura 4.7 mostra que, para cada frente, é verificado se a quantidade de massa lavrável calculada inicialmente é superior à quantidade máxima (Qu) existente na frente i e superior à capacidade máxima de produção da carregadeira alocada à frente i , por hora. Se pelo menos uma das duas situações acontecer, é escolhido, aleatoriamente, um caminhão l . Caso haja viagens desse caminhão l à frente i , é retirada uma viagem e recalculados o tempo total (tcv) do caminhão l e a quantidade de massa lavrável s_i . É atualizada também a variável que corresponde à somatória de todas as massas lavráveis, seja de minério (t), seja de estéril (est). Esse procedimento é repetido para todas as frentes até que não haja mais nenhuma inviabilidade.

Esse processo de geração de uma solução inicial é repetido *IterConstr* vezes e, em cada vez, aplica-se o método da descida em vizinhança variável (VND), descrito na Figura 4.45 da seção 4.3.8, e a melhor solução obtida é utilizada como solução inicial para o ILS. Este procedimento tem a vantagem de produzir uma solução inicial de boa qualidade rapidamente, já que a busca local exige pouco esforço computacional.

4.3.4 Avaliação de uma Solução

Uma solução s é avaliada com relação aos desvios das metas de produção e qualidade. Considerando que o modelo heurístico pode gerar inviabilidades, além da função objetivo do modelo de programação matemática, descrito na equação (4.1), são acrescentadas outras parcelas para penalizar tais ocorrências. Adicionalmente, são utilizados, também, componentes na função de avaliação para guiar a busca no espaço de soluções.

Assim, uma solução s é avaliada em função da produção, da qualidade do produto final e da alocação dos equipamentos utilizados (carga e transporte), de acordo com a equação a seguir:

$$f(s) = f^p(s) + \sum_{j \in T} f_j^q(s) + f^l(s) + \sum_{l \in V} f_l^u(s) + \sum_{k \in C} f_k^c(s) \quad 4.26$$

em que:

$f^p(s)$: função que avalia s quanto à produção;

$f_j^q(s)$: função que avalia s quanto à qualidade do j -ésimo parâmetro de controle;

$f_l^u(s)$: função que avalia s quanto ao atendimento da taxa de utilização máxima do l -ésimo caminhão.

$f^l(s)$: função que avalia s quanto ao número de caminhões utilizados.

$f_k^c(s)$: função que avalia s quanto à produtividade da carregadeira k .

As duas últimas parcelas da função de avaliação são usadas apenas para guiar a busca no espaço de soluções e são desconsideradas na apresentação dos resultados de forma a permitir uma comparação com a função objetivo do modelo de programação matemática.

A seguir, é mostrada a avaliação de cada um dos componentes da função $f(s)$:

- **Produção de Minério e Estéril**

A Produção de minério e estéril é avaliada pela equação 4.27.

$$f^p(s) = \beta \times (|Pr - P| + \gamma \times |Pre - Pe|) \quad 4.27$$

onde:

P : Produção de minério (t);

Pr : Meta de Produção de Minério (t);

Pe : Produção de Estéril (t);

Pre : Meta de Produção de Estéril (t);

β : Penalidade por não atendimento à meta de minério;

γ : Penalidade por não atendimento à meta de estéril.

A Produção P é calculada segundo a equação 4.28, ou seja, é obtida pela multiplicação do número de viagens dos caminhões às frentes, pela capacidade de carga de cada caminhão.

$$P = \sum_{i \in M} \sum_{l \in V} n_{il} cap_l \quad 4.28$$

onde:

M : conjunto de frentes de minério;

V : conjunto de equipamentos de transporte;

n_{il} : número de viagens de um caminhão l à frente i ;

cap_l : capacidade do caminhão l (t);

Para o cálculo de Pe , substitui-se o conjunto das frentes de minério M pelo conjunto E das frentes de estéril e aplica-se a fórmula 4.28.

▪ Qualidade da Mistura

A qualidade da mistura é avaliada segundo a equação 4.29.

$$f_j^q(s) = \alpha_j^q \times P \times \frac{|tr_j - tm_j|}{100} \quad \forall j \in T \quad 4.29$$

onde :

tm_j : Valor percentual encontrado para o parâmetro j (%) na mistura;

tr_j : Meta de qualidade para o parâmetro j (%);

P : Produção de minério (t);

α_j^q : Penalidade por não atendimento à meta de qualidade do parâmetro de controle j ;

O valor tm_j é calculado através da média ponderada entre t_{ij} e a produção (em uma hora) de cada frente i de minério, conforme mostrado na equação 4.30.

$$tm_j = \frac{\sum_{i \in M} t_{ij} x_i}{\sum_{i \in M} x_i} \quad \forall j \in T \quad 4.30$$

onde o ritmo de lavra em cada frente i é calculado com base na equação a seguir:

$$x_i = \sum_{l \in V} n_{il} cap_l \quad 4.31$$

▪ Taxa de utilização dos caminhões

A utilização dos caminhões é avaliada pela equação 4.32.

$$f_l^u(s) = \mu \times |Tx_l - TxMax_l| \quad \forall l \in V \quad 4.32$$

onde:

μ : Penalidade por se ultrapassar a taxa máxima de utilização dos caminhões;

$TxMax_l$: Taxa máxima permitida de utilização do caminhão l ;

Tx_l : Taxa de utilização do caminhão l , dada por:

$$Tx_l = \sum_{i \in F} n_{il} tc_{il} \quad \forall l \in V \quad 4.33$$

sendo n_{il} o número de viagens realizadas pelo caminhão l à frente i e tc_{il} o tempo de ciclo do caminhão l à frente i .

São utilizados dois valores para o peso μ na expressão (4.32): um valor alto (μ_A) caso a quantidade transportada esteja acima da máxima permitida e outro valor, mais baixo (μ_B), caso a quantidade transportada esteja abaixo da máxima permitida.

▪ **Número de caminhões utilizados**

A avaliação do número de caminhões utilizados é feita com base na equação 4.34.

$$f^l(s) = \omega \times \sum_{l \in V} \lceil Tx_l \rceil \quad 4.34$$

onde:

ω : Penalidade pela utilização de caminhões;

$\lceil Tx_l \rceil$: Função que assume valor igual a 1 se o caminhão l for utilizado;

▪ **Avaliação da produtividade das carregadeiras**

A produtividade das carregadeiras é avaliada pela equação 4.35.

$$f_k^c(s) = \begin{cases} \varphi \times (Cu_k - prod_k) & \text{se } Cl_k \leq prod_k \leq Cu_k \\ \lambda \times (Cl_k - prod_k) & \text{se } prod_k < Cl_k \end{cases} \quad \forall k \in C \quad 4.35$$

onde:

φ : Penalidade por não se atingir a produtividade máxima da carregadeira k ;

λ : Penalidade por utilizar uma carregadeira k com uma produtividade inferior à mínima;

4.3.5 Movimentos e Estruturas de Vizinhanças

Seja s' uma solução vizinha de uma dada solução s , e seja *movimento* alguma alteração que proporcione mudança na solução corrente. A construção de s' é determinada após se aplicar um ou mais movimentos.

Foram desenvolvidos vários tipos de movimentos, aplicáveis tanto para as frentes de minério quanto para as de estéril:

- Retirar uma viagem de um caminhão em uma frente qualquer (Retirar_Viagem);
- Retirar duas viagens de um caminhão em uma frente qualquer (Retirar_Duas_Viagens);
- Realocar uma viagem a uma frente diferente, mantendo o caminhão (Realocar_Viagem_mc);
- Realocar uma viagem a um caminhão diferente, mantendo a frente (Realocar_Viagem_mf);
- Realocar um equipamento de carga, uma única vez (Realocar_Carregadeira);
- Ativar um equipamento de carga (Ativar_Carregadeira);
- Desativar um equipamento de carga (Desativar_Carregadeira);
- Inserir uma viagem de um caminhão em uma frente (Inserir_Viagem);
- Retirar todas as viagens de um caminhão em todas as frentes (Retirar_Viagens);
- Trocar carregadeira inativa por uma ativa (Trocar_carregadeira);

Esses movimentos definem as estruturas de vizinhança e são detalhados a seguir.

4.3.5.1 Movimento Retirar_Viagem

O movimento “Retirar Viagem” consiste em retirar uma viagem de um determinado caminhão, ou seja, seleciona-se uma célula n_{il} da matriz N e subtrai-se uma viagem do caminhão l na frente i .

A Figura 4.8 ilustra o movimento relatado acima.

Antes do Movimento								Depois do Movimento							
	1	2	3	4	5	...	V		1	2	3	4	5	...	V
1	2	0	1	4	1	...	1	1	2	0	1	4	1	...	1
2	0	3	5	1	0	...	4	2	0	3	4	1	0	...	4
3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F	1	0	2	5	2	...	0	F	1	0	2	5	2	...	0

Figura 4.8 – Movimento Retirar_uma_viagem

Nessa figura o caminhão de número 3 realiza 5 viagens à frente 2, inicialmente. Após a implementação desse movimento, este caminhão passa a realizar 4 viagens à frente 2.

4.3.5.2 Movimento Retirar_Duas_Viagens

Nesse movimento, o procedimento é análogo ao mostrado no item 4.3.5.1. Consiste em retirar duas viagens de um determinado caminhão, ou seja, seleciona-se uma célula n_{il} da matriz N e subtraem-se duas viagens do caminhão l na frente i .

A Figura 4.9 ilustra o movimento relatado acima.

Antes do Movimento								Depois do Movimento							
	1	2	3	4	5	...	V		1	2	3	4	5	...	V
1	2	0	1	4	1	...	1		2	0	1	2	1	...	1
2	0	3	5	1	0	...	4		0	3	5	1	0	...	4
3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1		-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...		...	...	...	...	...	...	...
F	1	0	2	5	2	...	0		1	0	2	5	2	...	0

Figura 4.9 – Movimento Retirar_duas_viagens

Nessa figura o caminhão de número 4 realiza 4 viagens à frente 1, inicialmente. Após a implementação desse movimento, este caminhão passa a realizar 2 viagens à frente 1.

4.3.5.3 Movimento Realocar_Viagem_mc

O movimento “Realocar_Viagem_mc” consiste em transferir uma viagem de uma frente i para uma outra frente i' , mantendo o mesmo caminhão l , isto é, seleciona-se uma célula n_{il} da matriz N , retira-se uma viagem, seleciona-se outra célula $n_{i'l}$ da matriz N e faz-se a transferência da viagem.

A Figura 4.10 ilustra este movimento.

Antes do Movimento								Depois do Movimento							
	1	2	3	4	5	...	V		1	2	3	4	5	...	V
1	2	0	1	4	1	...	1	1	2	0	1	4	1	...	1
2	0	3	5	1	0	...	4	0	3	5	1	1	1	...	4
3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F	1	0	2	5	2	...	0	1	0	2	5	1	1	...	0

Figura 4.10 – Movimento Realocar uma Viagem mantendo o caminhão

Na Figura 4.10 o caminhão de número 5 realiza 2 viagens à frente F e nenhuma viagem à frente 2, inicialmente. Após a implementação deste movimento, este caminhão passa a realizar 1 viagem à frente F e 1 viagem frente 2.

4.3.5.4 Movimento Realocar_Viagem_mf

O movimento “Realocar_Viagem_mf” consiste em transferir uma viagem de um caminhão l para um outro caminhão l' , mantendo a mesma frente i , isto é, seleciona-se uma célula n_{il} da matriz N , retira-se uma viagem, seleciona-se outra célula $n_{i'l'}$ da matriz N e faz-se a transferência da viagem.

A Figura 4.11 ilustra este movimento.

Antes do Movimento								Depois do Movimento							
	1	2	3	4	5	...	V		1	2	3	4	5	...	V
1	2	0	1	4	1	...	1	1	2	0	1	4	1	...	1
2	0	3	5	1	0	...	4	2	0	2	5	2	0	...	4
3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F	1	0	2	5	2	...	0	F	1	0	2	5	2	...	0

Figura 4.11 – Movimento Realocar uma Viagem mantendo a frente

Nessa figura o caminhão de número 2 realiza 3 viagens à frente 2 e o caminhão 4 realiza 1 viagem à frente 2, inicialmente. Após a implementação desse movimento, o caminhão 2 passa a realizar 2 viagens e o caminhão 4 realiza também 2 viagens à frente 2.

4.3.5.5 Movimento Realocar_Carregadeira

No movimento “Realocar_Carregadeira”, procede-se da seguinte forma: a carregadeira k e todas as viagens alocadas à frente i são transferidas para uma outra frente i' . Da mesma forma, a carregadeira k' e todas as viagens alocadas à frente i' são transferidas para a frente i (se houver carregadeira alocada à frente i').

A Figura 4.12 ilustra este movimento.

Antes do Movimento									Depois do Movimento								
	Carreg	1	2	3	4	5	...	V		Carreg	1	2	3	4	5	...	V
1	(3, 1)	2	0	1	4	1	...	1		(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
2	(6, 1)	0	3	5	1	0	...	4		(6, 1)	0	3	5	1	0	...	4
3	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1		(3, 1)	2	0	1	4	1	...	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...		...	...	...	...	...	...	...	...
F	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0		(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0

Figura 4.12 – Movimento Realocar Carregadeira

A Figura 4.12 mostra o movimento “Realocar_Carregadeira” efetuado nas frentes 1 e 3. A carregadeira de número 3 alocada à frente 1 é transferida para a frente 3 bem como todas as viagens alocadas à essa frente. Mesmo não havendo carregadeira alocada à frente 3, inicialmente, todos os dados relativos a essa frente são transferidos à frente 1.

4.3.5.6 Movimento Ativar_Carregadeira

Esse movimento consiste em ativar uma carregadeira, isto é, seleciona-se uma carregadeira, verifica-se se ela encontra-se desativada e, caso esteja, muda-se o seu estado para ativada. Se a carregadeira selecionada não estiver desativada, repete-se o procedimento um certo número de vezes até que se encontre uma desativada ou até que se ultrapasse esse número de vezes, no caso, dado pelo produto do número de frentes pelo número de caminhões.

A Figura 4.13 mostra o movimento “Ativar_Carregadeira” efetuado na frente 2. A carregadeira de número 6 alocada na frente 2 que estava desativada passa a estar ativa. Isso significa que, a partir daquele momento, essa frente estará em atividade podendo, portanto, ter caminhões alocados a ela.

Antes do Movimento								Depois do Movimento									
	Carreg	1	2	3	4	5	...	V		Carreg	1	2	3	4	5	...	V
1	(3, 1)	2	0	1	4	1	...	1	(3, 1)	2	0	1	4	1	...	1	
2	(6, 0)	0	0	0	0	0	...	0	(6, 1)	0	0	0	0	0	...	0	
3	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
F	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0	

Figura 4.13 – Movimento Ativar Carregadeira

4.3.5.7 Movimento Desativar_Carregadeira

O movimento “Desativar_Carregadeira” consiste em desativar uma carregadeira, isto é, seleciona-se uma carregadeira, verifica-se se ela encontra-se ativada e, caso

esteja, muda-se o seu estado para desativada. Caso não esteja, repete-se o procedimento até encontrar uma carregadeira ativa. Encontrando, retiram-se todas as viagens alocadas aos caminhões que trabalham naquela frente.

A Figura 4.14 ilustra este movimento.

Antes do Movimento									Depois do Movimento								
	Carreg	1	2	3	4	5	...	V		Carreg	1	2	3	4	5	...	V
1	(3, 1)	2	0	1	4	1	...	1	(3, 1)	2	0	1	4	1	1	...	1
2	(6, 1)	3	0	1	0	1	...	0	(6, 0)	0	0	0	0	0	0	...	0
3	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	...	0

Figura 4.14 – Movimento Desativar Carregadeira

A Figura 4.14 mostra o movimento “Desativar_Carregadeira” efetuado na frente 2. A carregadeira de número 6 alocada na frente 2 que estava ativa passa a estar desativada. Observa-se que todas as viagens foram zeradas a partir do momento em que a carregadeira foi desativada.

4.3.5.8 Movimento Inserir_Viagem

O movimento “Inserir_Viagem” consiste em inserir uma viagem para um determinado caminhão, ou seja, seleciona-se uma célula n_{il} da matriz N e adiciona-se uma viagem do caminhão l na frente i .

A Figura 4.15 ilustra este movimento.

Antes do Movimento								Depois do Movimento							
	1	2	3	4	5	...	V		1	2	3	4	5	...	V
1	2	0	1	4	1	...	1	1	2	0	1	5	1	...	1
2	0	3	5	1	0	...	4	2	0	3	5	1	0	...	4
3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	3	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F	1	0	2	5	2	...	0	F	1	0	2	5	2	...	0

Figura 4.15 – Movimento Inserir uma viagem

Nessa figura o caminhão de número 4 realiza 4 viagens à frente 1, inicialmente. Após a implementação desse movimento, este caminhão passa a realizar 5 viagens à frente 1.

4.3.5.9 Movimento Retirar_Viagens

O movimento “Retirar_Viagens” consiste em selecionar um caminhão e retirar todas as viagens alocadas a esse caminhão em todas as frentes.

A Figura 4.16 mostra o movimento “Retirar Viagens” efetuado na frente 5. Observa-se que todas as viagens foram zeradas nessa frente.

Antes do Movimento								Depois do Movimento									
	Carreg	1	2	3	4	5	...	V		Carreg	1	2	3	4	5	...	V
1	(3, 1)	2	0	1	4	1	...	1		(3, 1)	2	0	1	4	0	...	1
2	(6, 1)	3	0	1	0	1	...	0		(6, 1)	3	0	1	0	0	...	0
3	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1		(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...	...		...	...	...	...	...	...	...	...
F	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0		(1, 1)	1	0	2	5	0	...	0

Figura 4.16 – Movimento Retirar Viagens

4.3.5.10 Movimento Trocar_carregadeira

Esse movimento consiste em trocar de carregadeira em uma determinada frente. Inicialmente, procura-se uma carregadeira inativa. Esse procedimento é repetido até que se encontre tal carregadeira ou se atinja um certo número de vezes, dado por pelo produto do número de frentes pelo número de caminhões. Caso exista uma carregadeira inativa, procura-se, agora, uma que esteja ativa e que possua capacidade de produção inferior à inativa. Se encontrar, faz-se a troca das carregadeiras sem trocar as respectivas viagens. Caso não se encontre uma carregadeira inativa, o movimento não é realizado.

A Figura 4.17 ilustra este movimento.

Antes do Movimento								Depois do Movimento									
	Carreg	1	2	3	4	5	...	V		Carreg	1	2	3	4	5	...	V
1	(3, 1)	2	0	1	4	1	...	1	(4, 1)	2	0	1	4	1	1	...	1
2	(4, 0)	0	0	0	0	0	...	0	(3, 0)	0	0	0	0	0	0	...	0
3	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	(-1,0)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0	(1, 1)	1	0	2	5	2	...	0	0

Figura 4.17 – Movimento Trocar Carregadeira

A Figura 4.17 mostra o movimento “Trocar Carregadeira” efetuado nas frentes 1 e 2. A carregadeira de número 4, inativa, alocada à frente 2 é transferida para a frente 1 e a carregadeira 3, alocada à frente 1 e de capacidade inferior à carregadeira 4 é transferida para a frente 2. Com isso, após a troca, a carregadeira 4 passa a ter o *status* de ativa, ao contrário da carregadeira 3 que torna-se inativa.

4.3.6 Métodos de Busca Local Aplicados ao Planejamento de Lavra

As técnicas de busca local, também conhecidas como heurísticas de refinamento em problemas de otimização, são baseadas na noção de vizinhança.

Essa classe de heurística parte de uma solução inicial qualquer e caminha, a cada iteração, de vizinho para vizinho de acordo com a definição de vizinhança adotada.

Para explorar o espaço de soluções do Problema de Alocação Dinâmica de Caminhões em questão, foram utilizados os métodos de busca local mostrados a seguir.

4.3.6.1 Descida com retirada de uma viagem

Este método consiste em aplicar o método da Descida utilizando o movimento “retirar uma viagem”, descrito na seção 4.3.5.1.

A Figura 4.18 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

Neste procedimento, para cada caminhão com alguma viagem é retirada uma viagem e analisada sua função de avaliação. A retirada que produzir a melhor função de avaliação é realizada, desde que represente uma melhora global.

```

Procedimento Descida_tirar1_Viagem(N, Tcv, Tc, S, fo, Cap);
  Variáveis  $i, l, fo'$ : inteiro;
           Melhorou: lógico;

  Início
    Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;
    Repita
       $fo' \leftarrow fo$ ;           {guardar a solução corrente}
      escolher_melhor_vizinho( $fo', i, l$ );
      se  $fo' < fo$                  {se melhorou}
         $fo \leftarrow fo'$ ;
         $n[i, l] \leftarrow n[i, l] - 1$ ;      {tirar uma viagem}
         $tcv[l] \leftarrow tcv[l] - tc[i, l]$ ; {atualizar tempo caminhão}
         $s[i] \leftarrow s[i] - cap[l]$ ; {atualizar massa lavrada na frente}
        se minério                 {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}
           $t \leftarrow t - Cap[l]$ 
           $senão\ est \leftarrow est - Cap[l]$ ;
        senão
          melhorou  $\leftarrow$  falso;
        fim se
      até não melhorou;
  Fim{ Descida_tirar1_viagem }
  
```

Figura 4.18 – Descida_tirar_uma_viagem

4.3.6.2 Descida com retirada de duas viagens

Este método consiste na aplicação do método da Descida utilizando o movimento “retirar duas viagens”, descrito na seção 4.3.5.2.

A Figura 4.19 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

Neste procedimento, para cada caminhão com duas ou mais viagens são retiradas duas viagens e analisada sua função de avaliação. A retirada que produzir a melhor função de avaliação é realizada, desde que represente uma melhora global.

```
Procedimento Descida_tirar2_Viagens(N, Tcv, Tc, S, fo, Cap);  
  Variáveis  $i, l, fo'$ : inteiro;  
           Melhorou: lógico;  
Início  
  Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;  
  Repita  
     $fo' \leftarrow fo$ ; { guardar a solução corrente}  
    escolher_melhor_vizinho( $fo', i, l$ );  
    se  $fo' < fo$  { se melhorou}  
       $fo \leftarrow fo'$ ;  
       $n[i, l] \leftarrow n[i, l] - 2$ ; { tirar uma viagem}  
       $tcv[l] \leftarrow tcv[l] - 2*(tc[i, l])$ ; { atualizar tempo caminhão}  
       $s[i] \leftarrow s[i] - 2*(cap[l])$ ; { atualizar massa lavrada na frente}  
      se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}  
         $t \leftarrow t - Cap[l]$   
         $senão\ est \leftarrow est - 2*Cap[l]$ ;  
       $senão$   
        melhorou  $\leftarrow$  falso;  
      fim se  
    até não melhorou;  
Fim{ Descida_tirar2_viagens }
```

Figura 4.19 – Descida_tirar_duas_viagens

4.3.6.3 Descida com realocação de uma viagem mantendo o caminhão

Esse método consiste em aplicar o método da Descida utilizando o movimento “realocar uma viagem_mc”, descrito na seção 4.3.5.3.

A Figura 4.20 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

```

Procedimento Descida_Realocar_uma_Viagem_mc(N, Tcv, Tc, S, fo, Cap);
  Variáveis  $i, l, i', fo'$ : inteiro;
  Melhorou: lógico;

Início
  Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;
  Repita
     $fo' \leftarrow fo$ ; {guardar a solução corrente}
    escolher_melhor_vizinho( $fo', i, l, i'$ );
    se  $fo' < fo$  {se melhorou}
       $fo \leftarrow fo'$ ;
       $n[i, l] \leftarrow n[i, l] - 1$ ; {tirar uma viagem}
       $tcv[l] \leftarrow tcv[l] - tc[i, l]$ ; {atualizar tempo caminhão}
       $s[i] \leftarrow s[i] - Cap[l]$ ; {atualizar massa lavrada na frente  $i$ }
      se minério {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}
         $t \leftarrow t - Cap[l]$ 
         $senão\ est \leftarrow est - Cap[l]$ ;
       $n[i', l] \leftarrow n[i', l] + 1$ ; {realocar uma viagem}
       $tcv[l] \leftarrow tcv[l] + tc[i', l]$ ; {atualizar tempo caminhão}
       $s[i'] \leftarrow s[i'] + Cap[l]$ ; {atualizar massa lavrada na frente  $i'$ }
      se minério {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}
         $t \leftarrow t + Cap[l]$ 
         $senão\ est \leftarrow est + Cap[l]$ ;
       $senão$ 
        melhorou  $\leftarrow$  falso;
      fim se
    até não melhorou;
Fim { Descida_Realocar_uma_Viagem_mc }

```

Figura 4.20 – Descida_realocação_de_viagem_mantendo_caminhão

Neste procedimento, para cada caminhão com alguma viagem é realocada uma viagem para outra frente e analisada sua função de avaliação. Aquela que produzir a melhor função de avaliação é feita, desde que represente uma melhora global.

4.3.6.4 Descida com realocação de uma viagem mantendo a frente

Este método consiste na aplicação do método da Descida utilizando o movimento “realocar uma viagem_mf”, descrito na seção 4.3.5.4.

A Figura 4.21 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

```

Procedimento Descida_Realocar_uma_Viagem_mf(N, Tcv, Tc, S, fo, Cap);
  Variáveis  $i, l, l', fo'$ : inteiro;
           Melhorou: lógico;

Início
  Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;
  Repita
     $fo' \leftarrow fo$ ;           { guardar a solução corrente }
    escolher_melhor_vizinho( $fo', i, l, l'$ );
    se  $fo' < fo$                  { se melhorou }
       $fo \leftarrow fo'$ ;
       $n[i, l] \leftarrow n[i, l] - 1$ ;      { tirar uma viagem }
       $tcv[l] \leftarrow tcv[l] - tc[i, l]$ ; { atualizar tempo caminhão }
       $s[i] \leftarrow s[i] - cap[l]$ ;    { atualizar massa lavrada na frente  $i$  }
      se minério                 { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }
         $t \leftarrow t - cap[l]$ 
         $senão\ est \leftarrow est - cap[l]$ ;
       $n[i, l'] \leftarrow n[i, l'] + 1$ ;    { realocar uma viagem }
       $tcv[l'] \leftarrow tcv[l'] + tc[i, l']$ ; { atualizar tempo caminhão }
       $s[i] \leftarrow s[i] + cap[l']$ ;    { atualizar massa lavrada na frente  $i$  }
      se minério                 { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }
         $t \leftarrow t - cap[l]$ 
         $senão\ est \leftarrow est - cap[l]$ ;
       $senão$ 
        melhorou  $\leftarrow$  falso;
      fim se
    até não melhorou;
Fim { Descida_Realocar_uma_Viagem_mf }

```

Figura 4.21 – Descida_realocação_de_viagem_mantendo_frente

Neste procedimento, para cada frente, é realocada uma viagem de um caminhão para outro, caso exista alguma viagem e analisada sua função de avaliação. Aquela que produzir a melhor função de avaliação é realizada, desde que represente uma melhora global.

4.3.6.5 Descida inserir uma viagem

Este método consiste em aplicar o método da Descida utilizando o movimento “inserir uma viagem”, descrito na seção 4.3.5.8.

A Figura 4.22 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

```

Procedimento Descida_Inserir1_Viagem(N, Tcv, Tc, S, fo, Cap);
  Variáveis  $i, l, fo'$ : inteiro;
           Melhorou: lógico;

Início
  Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;
  Repita
     $fo' \leftarrow fo$ ;           { guardar a solução corrente }
    escolher_melhor_vizinho( $fo', i, l$ );
    se  $fo' < fo$                  { se melhorou }
       $fo \leftarrow fo'$ ;
       $n[i, l] \leftarrow n[i, l] + 1$ ;   { inserir uma viagem }
       $tcv[l] \leftarrow tcv[l] + tc[i, l]$ ; { atualizar tempo caminhão }
       $s[i] \leftarrow s[i] + cap[l]$ ; { atualizar massa lavrada na frente }
      se minério                 { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }
         $t \leftarrow t + cap[l]$ 
         $senão\ est \leftarrow est + cap[l]$ ;
       $senão$ 
        melhorou  $\leftarrow$  falso;
      fim se
    até não melhorou;
Fim{ Descida_inserir1_viagem }

```

Figura 4.22 – Descida_inserir_uma_viagem

Neste procedimento, para cada caminhão é inserida uma viagem e analisada sua função de avaliação. Aquela que produzir a melhor função de avaliação é realizada, desde que represente uma melhora global.

4.3.6.6 Descida tirar viagens

Este método consiste na aplicação do método da Descida utilizando uma adaptação do movimento “retirar_viagens”, descrito na seção 4.3.5.9.

A Figura 4.23 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

```

Procedimento Descida_Tirar_Viagens(N, Tcv, Tc, S, fo, Cap);
  Variáveis  $i, l, fo'$ : inteiro;
           Melhorou: lógico;

Início
  Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;
  Repita
     $fo' \leftarrow fo$ ;           {guardar a solução corrente}
    escolher_melhor_vizinho( $fo', i, l$ );
    se  $fo' < fo$                  {se melhorou}
       $fo \leftarrow fo'$ ;
      se  $n[i, l] > 0$ 
         $tcv[l] \leftarrow tcv[l] - (n[i, l] * tc[i, l])$ ; {atualizar tempo caminhão}
         $s[i] \leftarrow s[i] - (n[i, l] * cap[l])$ ; {atualizar massa lavrada na frente}
        se minério               {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}
           $t \leftarrow t - (n[i, l] * cap[l])$ 
           $senão\ est \leftarrow est - (n[i, l] * cap[l])$ ;
           $n[i, l] := 0$ ; {atualizar (zerar) viagens}
         $senão$ 
          melhorou  $\leftarrow$  falso;
      fim se
    até não melhorou;
Fim{ Descida_tirar_viagens }

```

Figura 4.23 – Descida_tirar_viagens

Neste procedimento, para cada caminhão com uma ou mais viagens em uma determinada frente, são retiradas todas as viagens e analisada sua função de avaliação. A retirada que produzir a melhor função de avaliação é realizada, desde que represente uma melhora global.

4.3.6.7 Descida desativar carregadeira

Este método consiste na aplicação do método da Descida utilizando o movimento “desativar_carregadeira”, descrito na seção 4.3.5.7.

A Figura 4.24 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

```

Procedimento Descida_Desativar_Carregadeira(N, Tcv, Tc, S, fo, Cap);
  Variáveis  $i, l, fo'$ : inteiro;
           Melhorou: lógico;
Início
  Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
  Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;
  Repita
     $fo' \leftarrow fo$ ;           {guardar a solução corrente}
    escolher_melhor_vizinho( $fo', i$ );
    se  $fo' < fo$                 {se melhorou}
       $fo \leftarrow fo'$ ;
      para  $l$  de 1 até Ncam
        se  $n[i, l] > 0$ 
           $tcv[l] \leftarrow tcv[l] - (n[i, l] * tc[i, l]);$  {atualizar tempo caminhão}
           $s[i] \leftarrow s[i] - (n[i, l] * cap[l]);$  {atualizar massa lavrada na frente}
          se minério           {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}
             $t \leftarrow t - (n[i, l] * cap[l])$ 
             $senão\ est \leftarrow est - (n[i, l] * cap[l]);$ 
             $n[i, l] \leftarrow 0$ ; {atualizar (zerar) viagens}
           $senão$ 
            melhorou  $\leftarrow$  falso;
        fim se
      até não melhorou;
Fim{ Descida_Desativar_Carregadeira }

```

Figura 4.24 – Descida_desativar_carregadeira

Neste procedimento, para cada frente onde exista uma carregadeira ativa, são retiradas todas as viagens de todos os caminhões e analisada sua função de avaliação. A retirada que produzir a melhor função de avaliação é realizada, desde que represente uma melhora global.

4.3.6.8 Descida realocar carregadeira

Este método consiste na aplicação do método da Descida utilizando o movimento “realocar_carregadeira”, descrito na seção 4.3.5.5.

A Figura 4.25 ilustra o pseudocódigo desta busca local.

```

Procedimento Descida_Realocar_Carregadeira(N, Tcv, Tc, S, fo, Y, Cap);
  Variáveis  $i, l, fo', aux$ : inteiro;
             Melhorou: lógico;

Início
  Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
  Melhorou  $\leftarrow$  verdadeiro;
  Repita
     $fo' \leftarrow fo$ ;           { guardar a solução corrente }
    escolher_melhor_vizinho( $fo', i, k$ );
    se  $fo' < fo$                 { se melhorou }
       $fo \leftarrow fo'$ ;
    // troca viagens
    para  $l$  de 1 até Ncam
       $aux \leftarrow n[i, l]$ ;
       $n[i, l] \leftarrow n[k, l]$ ;
       $n[k, l] \leftarrow aux$ ;
    // troca carregadeiras
     $aux \leftarrow y[i].N\_carr$  ;
     $y[i].N\_carr \leftarrow y[k].N\_carr$ ;
     $y[k].N\_carr \leftarrow aux$ ;
     $aux \leftarrow Y[i].N\_ativo$  ;
     $y[i].N\_ativo \leftarrow y[k].N\_ativo$ ;
     $y[k].N\_ativo \leftarrow aux$ ;
    Gera_nova_massa_lavrável_por_frente;
    Gera_novo_tempo_por_caminhão;
    Gera_total_de_massa_lavrável;
    Gera_novas_percentagens;
  senão
    melhorou  $\leftarrow$  falso;
  fim se
  até não melhorou;
Fim{ Descida_Realocar_Carregadeira }

```

Figura 4.25 – Descida_realocar_carregadeira

Neste procedimento, para cada frente onde exista uma carregadeira ativa, é feita a inversão dessa carregadeira com as seguintes trocando também as viagens de cada caminhão e analisada sua função de avaliação. A inversão que produzir a melhor função de avaliação é realizada, desde que represente uma melhora global.

4.3.7 Perturbações

Para tentar escapar de ótimos locais, ainda distante do ótimo global, o método *Iterated Local Search*, que será descrito na seção 4.3.8, utiliza-se de mecanismos de

perturbações. Foram desenvolvidas as seguintes perturbações para o método ILS aplicado ao planejamento de lavra:

4.3.7.1 Perturbação “Retirar uma viagem”

Nessa perturbação, é utilizado o movimento “Retirar uma Viagem”, descrito na seção 4.3.5.1. São gerados aleatoriamente dois valores (i,l) . O primeiro se refere à frente i e o segundo, ao caminhão l . Se houver viagens alocadas para o caminhão l , é retirada uma viagem da célula n_{il} da matriz N ; caso contrário, o procedimento é repetido até que se encontre um caminhão l com pelo menos uma viagem à frente i .

A Figura 4.26 mostra o pseudocódigo referente à perturbação “Retirar uma Viagem” no qual as frentes e os caminhões são escolhidos de forma aleatória até que se encontre viagens alocadas.

Procedimento Perturbação_Retirar_uma_viagem(N); Variáveis i,l:inteiro; Início $MaxFr \leftarrow$ n° máximo de frentes; $Ncam \leftarrow$ n° total de caminhões; Repita $i \leftarrow$ aleatório($MaxFr$); $l \leftarrow$ aleatório($Ncam$); até $n[i,l] > 0$; $n[i,l] \leftarrow n[i,l] - 1$; se minério {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril} $t \leftarrow t - cap[l]$ senão est $\leftarrow$ est – $cap[l]$; Fim{ Perturbação_Retirar_uma_viagem }

Figura 4.26 – Perturbação_Retirar_uma_viagem

4.3.7.2 Perturbação “Retirar duas viagens”

Esta perturbação utiliza-se do movimento “Retirar duas Viagens” descrito em 4.3.5.2, análogo ao mostrado no item 4.3.7.1. São gerados dois valores (i,l) , de forma aleatória, representando a frente i e o caminhão l . Se houver viagens alocadas para esse

caminhão, são retiradas duas viagens da célula n_{il} da matriz N. Caso contrário, são gerados outros valores (i,l) até que se encontre uma célula n_{il} que possua pelo menos duas viagens alocadas.

A Figura 4.27 mostra o pseudocódigo referente à perturbação “Retirar duas Viagens”.

```

Procedimento Perturbação_Retirar_duas_viagens(N);
  Variáveis  $i,l$ :inteiro;
  Início
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
    Repita
       $i \leftarrow$  aleatório(MaxFr);
       $l \leftarrow$  aleatório(Ncam);
    até  $n[i,l] \geq 2$ ;
     $n[i,l] \leftarrow n[i,l] - 2$ ;
    se minério      {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}
       $t \leftarrow t - \text{cap}[l]$ 
    senão est  $\leftarrow \text{est} - 2 * \text{cap}[l]$ ;
  Fim {Perturbação_Retirar_duas_viagens}

```

Figura 4.27 – Perturbação Retirar_duas_viagens

4.3.7.3 Perturbação “Realocar_Viagem_mc”

Na perturbação “Realocar uma Viagem mantendo caminhão” utiliza-se o movimento “Realocar_Viagem_mc”, descrito em 4.3.5.3. Geram-se inicialmente dois valores (i,l) , aleatoriamente. O primeiro diz respeito à frente i e o segundo, ao caminhão l . Para o primeiro valor i , verifica-se se existe um equipamento de carga alocado à frente i e, também, se este está ativo. Na inexistência de um equipamento satisfazendo essas condições, o procedimento é repetido até que a condição seja satisfeita. De posse do segundo valor l , verifica-se se existe viagem alocada à célula n_{il} da matriz N. Inexistindo um veículo com pelo menos uma viagem, procura-se aleatoriamente um novo veículo. Este procedimento é repetido até que seja encontrado um veículo com pelo menos uma viagem, interrompendo-se a busca caso ela não seja bem sucedida após um determinado número de iterações. Nesta última situação, nova frente é gerada

aleatoriamente. Este procedimento se encerra quando é gerada uma frente i e um caminhão l tal que $n_{il} > 0$. Em seguida, gera-se um outro valor, aleatoriamente, correspondente a uma outra frente i' , diferente da primeira i e que possua equipamento de transporte compatível com o equipamento de carga. Caso contrário, a frente i' é gerada novamente até que as condições acima sejam satisfeitas.

De posse de i , l e i' , ou seja, das frentes i e i' e do caminhão l , realoca-se uma viagem da célula n_{il} para a célula $n_{i'l}$, pertencentes à matriz N , isto é, o caminhão l deixa de fazer uma viagem à frente i para realizá-la na frente i' . Esse movimento poderá ser desfeito caso a quantidade total de massa lavrada da frente i' ($s_{i'}$) seja superior à quantidade máxima de produção da carregadeira ou, então, o tempo total utilizado pelo caminhão l para realizar todas as viagens seja superior a uma hora.

A Figura 4.28 mostra o pseudocódigo referente à perturbação “Realocar uma Viagem mantendo o caminhão”.

```

Procedimento Perturbação_Realocar_uma_Viagem_mc(N, S, Cu, Cap, Tcv, Y );
    Variáveis  $i, l, i'$ , cont: inteiro;
    Achou: lógico;

Início
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhos;
    Cont  $\leftarrow$  0;
    Achou  $\leftarrow$  falso;
Repita
    Repita
         $i \leftarrow$  aleatório(MaxFr);
    até encontrar carregadeira alocada e ativa;
Repita
     $l \leftarrow$  aleatório(Ncam);
    cont  $\leftarrow$  cont + 1;
    se  $n[i, l] > 0$  então Achou  $\leftarrow$  verdadeiro;
    até Achou ou cont > MaxFr * Ncam;
até Achou;
Repita
     $i' \leftarrow$  aleatório(MaxFr);
    até ( $n[i', l] <> -1$ ) e ( $i' <> i$ );
     $n[i, l] \leftarrow n[i, l] - 1$ ;
    se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }
         $t \leftarrow t - \text{cap}[l]$ 
        senão est  $\leftarrow$  est - cap[l];
     $n[i', l] \leftarrow n[i', l] + 1$ ;
    se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }
         $t \leftarrow t + \text{cap}[l]$ 
        senão est  $\leftarrow$  est + cap[l];
    se ( $s[i'] > \text{cu}[Y[i']]$ ) ou ( $\text{tcv}[l] > 60$ )
        { desfaz movimento }
         $n[i, l] \leftarrow n[i, l] + 1$ ;
        se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }
             $t \leftarrow t + \text{cap}[l]$ 
            senão est  $\leftarrow$  est + cap[l];
         $n[i', l] \leftarrow n[i', l] - 1$ ;
        se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }
             $t \leftarrow t - \text{cap}[l]$ 
            senão est  $\leftarrow$  est - cap[l];
Fim { Perturbação_Realocar_uma_Viagem_mc }

```

Figura 4.28 – Perturbação Realocar uma Viagem mantendo o caminho

4.3.7.4 Perturbação “Realocar_Viagem_mf”

A Figura 4.29 mostra o pseudocódigo referente à perturbação “Realocar uma Viagem mantendo a frente”.

```
Procedimento Perturbação_Realocar_uma_Viagem_mf(N, S, Cu, Cap, Tcv, Y);  
  Variáveis i, l, l', cont: inteiro;  
  Achou: lógico;  
  
  Início  
    MaxFr ← n° máximo de frentes;  
    Ncam ← n° total de caminhões;  
    Cont ← 0;  
    Achou ← falso;  
  Repita  
    Repita  
      i ← aleatório(MaxFr);  
    até encontrar carregadeira alocada e ativa;  
  Repita  
    l ← aleatório(Ncam);  
    cont ← cont + 1;  
    se n[i, l] > 0 então Achou ← verdadeiro;  
  até (Achou) ou (cont > (MaxFr * Ncam));  
  até Achou;  
  Repita  
    l' ← aleatório(Ncam);  
  até (n[i, l'] <> -1) e (l <> l');  
  n[i, l] ← n[i, l] - 1;  
  se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }  
    t ← t - cap[l]  
    senão est ← est - cap[l];  
  n[i, l'] ← n[i, l'] + 1;  
  se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }  
    t ← t + cap[l]  
    senão est ← est + cap[l];  
  se (s[i] > cu[y[i].N_carr]) ou (Tcv[ll] > 60)  
    { desfaz movimento }  
    n[i, l] ← n[i, l] + 1;  
    se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }  
      t ← t + cap[l]  
      senão est ← est + cap[l];  
    n[i, l'] ← n[i, l'] - 1;  
    se minério { atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril }  
      t ← t - cap[l]  
      senão est ← est - cap[l];  
Fim{ Perturbação_Realocar_uma_Viagem_mf }
```

Figura 4.29 – Perturbação Realocar uma Viagem mantendo a frente

Esta perturbação utiliza o movimento “Realocar_Viagem_mf” descrito em 4.3.5.4. De posse de uma frente i com uma carregadeira alocada e ativa e de dois caminhões l e l' , é realocada uma viagem da célula n_{il} para a célula $n_{il'}$, pertencentes à matriz N , isto é, uma viagem é transferida do caminhão l para o caminhão l' , mantendo-se a frente i .

4.3.7.5 Perturbação “Retirar_Viagem_2x”

Na perturbação “Retirar uma Viagem, duas vezes”, todo o procedimento explicitado no item 4.3.7.1 é executado duas vezes.

4.3.7.6 Perturbação “Retirar_Duas_Viagens_2x”

Essa perturbação é similar ao descrito no item 4.3.7.2, bastando repetir todo o procedimento duas vezes.

4.3.7.7 Perturbação “Realocar_Viagem_mc_2x”

Para se construir esta perturbação, basta repetir todo o procedimento descrito no item 4.3.7.3, duas vezes.

4.3.7.8 Perturbação “Realocar_Viagem_mf_2x”

Na perturbação “Realocar uma Viagem mantendo a frente, duas vezes”, é necessário repetir o procedimento descrito no item 4.3.7.4, duas vezes.

4.3.7.9 Perturbação “Realocar_Carregadeira”

Na perturbação “Realocar_Carregadeira” utiliza-se o movimento descrito na seção 4.3.5.5. Gera-se um valor referente à frente i , verificando-se se há carregadeira alocada e se a mesma encontra-se ativa. Caso isso não ocorra, gera-se novamente um

novo valor de i até que as condições prévias sejam satisfeitas. Em seguida, gera-se um segundo valor i' referente à outra frente, diferente do primeiro.

De posse dos valores de i e i' , ou seja, das frentes i e i' , efetua-se a troca entre as carregadeiras, isto é, a carregadeira que se encontra na frente i é realocada à frente i' e, caso haja carregadeira alocada à frente i' , esta é transferida à frente i . Também efetuam-se as trocas referentes aos números de viagens de cada caminhão alocados às duas frentes.

A Figura 4.30 mostra o pseudocódigo referente à perturbação Realocar_Carregadeira.

```
Procedimento Perturbação_Realocar_Carregadeira(N, S, Cu, Tcv, Y);
  Variáveis  $i, l, ii, aux$ : inteiro;
Início
  MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
  Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
  Repita
     $i \leftarrow$  aleatório(MaxFr);
    até encontrar carregadeira alocada e ativa;
     $ii \leftarrow$  aleatório(MaxFr);
    {troca viagens}
    Para  $l \leftarrow 1$  até Ncam faça
       $aux \leftarrow n[i, l]$ ;
       $n[i, l] \leftarrow n[ii, l]$ ;
       $n[ii, l] \leftarrow aux$ ;
    Fim para;
    {troca carregadeiras}
     $aux \leftarrow y[i].n\_carr$ ;
     $y[i].n\_carr \leftarrow y[ii].n\_carr$ ;
     $y[ii].n\_carr \leftarrow aux$ ;
Fim{ Perturbação_Realocar_Carregadeira }
```

Figura 4.30 – Perturbação Realocar Carregadeira

4.3.7.10 Perturbação “Desativar_Carregadeira”

Na perturbação “Realocar_Carregadeira” utiliza-se o movimento descrito na seção 4.3.5.7. Gera-se um valor referente à carregadeira k , verificando-se se a mesma encontra-se ativa. Caso isso não ocorra, gera-se novamente um novo valor de k até que

as condições acima sejam satisfeitas. Em seguida, localiza-se em qual frente i a carregadeira k está operando. De posse desses valores, a carregadeira k é desativada e são zeradas todas as viagens de cada caminhão j na frente i onde opera a carregadeira k .

A Figura 4.31 mostra o pseudocódigo referente à perturbação Desativar_Carregadeira.

```

Procedimento Perturbação_Desativar_Carregadeira(N, S, Cu, Cap, Tcv, Y);
  Variáveis  $i, l, ii, k$ : inteiro;
           achou: lógico;

  Início
    Ncarreg  $\leftarrow$  n° total de carregadeiras;
    MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
    Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
    achou  $\leftarrow$  falso;
    Repita
       $k \leftarrow$  aleatório(Ncarreg);
       $i \leftarrow 1$ ;
      Enquanto  $i \leq$  MaxFr faça
        se  $y[i].N_{carr} = k$ 
          se  $y[i].N_{ativo} = 1$            { encontrou carregadeira ativa }
             $y[i].N_{ativo} = 0$ ;         { muda status para inativa }
             $ii \leftarrow i$ ;
            achou  $\leftarrow$  verdadeiro
          fim se
           $i \leftarrow$  MaxFr;
        fim se
         $i \leftarrow i + 1$ ;
      Fim enquanto
    até achou = verdadeiro;
     $i \leftarrow ii$ ;
    { retirar viagens }
    Para  $l \leftarrow 1$  até Ncam faça
      se  $n[i, l] > 0$ 
        se minério
           $t \leftarrow t - (n[i, l] * cap[l])$ 
           $senão\ est \leftarrow est - (n[i, l] * cap[l]);$ 
        fim se
         $n[i, l] \leftarrow 0$ ;
      fim se
    Fim para
  Fim { Perturbação_Desativar_Carregadeira }

```

Figura 4.31 – Perturbação Desativar Carregadeira

4.3.7.11 Perturbação “Ativar_Carregadeira”

Na perturbação “Ativar_Carregadeira” utiliza-se o movimento descrito na seção 4.3.5.6. Gera-se um valor referente à carregadeira k , verificando-se se a mesma encontra-se inativa. Caso isso não ocorra, gera-se novamente um novo valor de k até que se encontre uma carregadeira inativa ou, um certo número de vezes, caso não exista nenhuma carregadeira inativa.

De posse desses valores, a carregadeira k é ativada e os caminhões já podem ser deslocados para esta frente de trabalho.

A Figura 4.32 mostra o pseudocódigo referente à perturbação Ativar_Carregadeira.

```
Procedimento Perturbação_Ativar_Carregadeira(N, S, Cu, Tcv, Y);  
  Variáveis  $i, l, k, nv, x$ : inteiro;  
           achou: lógico;  
Início  
  Ncarreg  $\leftarrow$  n° total de carregadeiras;  
  MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;  
  Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;  
  nv  $\leftarrow$  MaxFr * Ncam;  
  x  $\leftarrow$  0;  
  achou  $\leftarrow$  falso;  
  Repita  
    x  $\leftarrow$  x + 1;  
    k  $\leftarrow$  aleatório(Ncarreg);  
    i  $\leftarrow$  1;  
    Enquanto i  $\leq$  MaxFr faça  
      se y[i].N_carr = k  
        se y[i].N_ativo = 0      { encontrou carregadeira inativa }  
          y[i].N_ativo = 1;      { muda status para ativa }  
          achou  $\leftarrow$  verdadeiro;  
        fim se  
        i  $\leftarrow$  MaxFr;  
      fim se  
      i  $\leftarrow$  i + 1;  
    Fim enquanto  
  até (achou = verdadeiro) ou (x > nv);  
Fim { Perturbação_Ativar_Carregadeira }
```

Figura 4.32 – Perturbação Ativar Carregadeira

4.3.7.12 Perturbação “Trocar_Carregadeira”

Na perturbação “Trocar_Carregadeira” utiliza-se o movimento descrito na seção 4.3.5.10. Gera-se um valor referente à carregadeira k , verificando-se se a mesma encontra-se inativa. Caso isso não ocorra, gera-se novamente um novo valor de k até que se encontre uma carregadeira inativa ou que se atinja um certo número de vezes, dado pelo produto do número de frentes pelo número de caminhões. Nesta última situação, a perturbação não é realizada.

Encontrada a carregadeira inativa, armazena-se a frente onde exista uma carregadeira ativa com capacidade inferior à inativa. De posse dessa frente e havendo compatibilidade entre a carregadeira e os caminhões alocados à ela, faz-se a troca entre as duas carregadeiras sem trocar as viagens dos caminhões.

A Figura 4.33 mostra o pseudocódigo referente à perturbação Ativar_Carregadeira.

```

Procedimento Perturbação_Trocar_Carregadeira(N, S, Cu, Y, Compatib);
  Variáveis  $i, i', i'', l, k, nv, x, aux$ : inteiro;
           ok, achou: lógico;

Início
  Ncarreg  $\leftarrow$  n° total de carregadeiras;
  MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
  Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
  nv  $\leftarrow$  MaxFr * Ncam;
  x  $\leftarrow$  0;
  achou  $\leftarrow$  falso;
  Repita
    x  $\leftarrow$  x + 1;
    k  $\leftarrow$  aleatório(Ncarreg);
    i  $\leftarrow$  1;
    Enquanto i  $\leq$  MaxFr faça
      se y[i].N_carr = k
        se y[i].N_ativo = 0      {encontrou carregadeira inativa }
          i'  $\leftarrow$  i;
          achou  $\leftarrow$  verdadeiro;
        fim se
        i  $\leftarrow$  MaxFr;
      fim se
      i  $\leftarrow$  i + 1;
    Fim enquanto
  até (achou = verdadeiro) ou (x > nv);
  se x > nv abandone;
  nv  $\leftarrow$  1;
  Enquanto nv  $\leq$  Ncarreg faça
    i  $\leftarrow$  aleatório(MaxFr);
    se (y[i].N_carr  $\neq$  -1) e (Cu[y[i].N_carr] < Cu[y[i'].N_carr])
      se y[i].N_Ativo = 1
        i''  $\leftarrow$  i;
        ok  $\leftarrow$  falso;
        verifica_compatibilidade(ok, i', i'', Y, N, Compatib);
        se ok então
          // troca as carregadeiras
          aux  $\leftarrow$  y[i'].N_carr;
          y[i'].N_carr  $\leftarrow$  Y[i''].N_carr;
          y[i''].N_carr  $\leftarrow$  aux;
        fim se;
        nv  $\leftarrow$  Ncarreg;
      fim se
    fim se
    nv  $\leftarrow$  nv + 1;
  Fim enquanto;
Fim { Perturbação_Trocar_Carregadeira }

```

Figura 4.33 – Perturbação Trocar Carregadeira

4.3.7.13 Perturbação “Tirar_Viagens”

Nesta perturbação, é utilizado o movimento “Retirar_Viagens”, descrito na seção 4.3.5.9. É gerado aleatoriamente um valor l que se refere a um caminhão l . São retiradas todas as viagens alocadas para o caminhão l em todas as frentes.

A Figura 4.34 mostra o pseudocódigo referente à perturbação “Tirar_Viagens”.

```
Procedimento Perturbação_Tirar_Viagens(N);  
  Variáveis  $i, l$ : inteiro;  
Início  
  MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;  
  Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;  
   $l \leftarrow$  aleatório(Ncam);  
  Para  $i \leftarrow 1$  até MaxFr faça  
    se ( $n[i, l] > 0$ ) e ( $y[i].N\_ativo = 1$ )  
      então  
        se minério  
          então  $t \leftarrow t - (n[i, l] * cap[l])$   
          senão  $est \leftarrow est - (n[i, l] * cap[l])$   
        fim se  
         $n[i, l] \leftarrow 0$ ;  
      fim se  
    Fim para  
Fim{ Perturbação_Tirar_Viagens }
```

Figura 4.34 – Perturbação_tirar_viagens

4.3.7.14 Perturbação “Inserir_viagem”

Nesta perturbação, é utilizado o movimento “Inserir_Viagem”, descrito na seção 4.3.5.8. São gerados aleatoriamente dois valores (i, l) . O primeiro se refere à frente i e o segundo, ao caminhão l . Se houver carregadeira ativa nesta frente i e esta for compatível com o caminhão l , é inserida uma viagem da célula n_{il} da matriz N ; caso contrário, o procedimento é repetido até que se encontre uma frente onde haja uma carregadeira trabalhando, ou se atinja um número de vezes, dado pelo produto do número de frentes pelo número de caminhões. Neste último caso, a perturbação não é realizada.

A Figura 4.35 mostra o pseudocódigo referente à perturbação “Inserir uma Viagem”.

```

Procedimento Perturbação_Inserir_uma_viagem(N,Y);
  Variáveis  $i,l$ :inteiro;
Início
  MaxFr  $\leftarrow$  n° máximo de frentes;
  Ncam  $\leftarrow$  n° total de caminhões;
  vz  $\leftarrow$  MaxFr * Ncam;
  x  $\leftarrow$  0;
  Repita
    x  $\leftarrow$  x+1;
     $i \leftarrow$  aleatório(MaxFr);
     $l \leftarrow$  aleatório(Ncam);
  até (( $n[i,l] \geq 0$ ) e ( $y[i].N\_Ativo=1$ )) ou ( $x = vz$ );
  se  $x=vz$ 
    // incompatibilidade entre caminhão e carregadeira
    Abandone;
  fim se;
   $n[i,l] \leftarrow n[i,l] + 1$ ;
  se minério {atualizar massa lavrada geral de minério ou estéril}
     $t \leftarrow t + cap[l]$ 
  senão est  $\leftarrow$  est +  $cap[l]$ ;
  fim se
Fim{ Perturbação_Inserir_uma_viagem }

```

Figura 4.35 – Perturbação_Retirar_uma_viagem

4.3.8 Iterated Local Search (ILS)

A Figura 4.36 ilustra o pseudocódigo referente ao método *Iterated Local Search* adaptado ao Problema de Alocação Dinâmica de Caminhões.

```
Procedimento ILS(fo,N,S,Qu,Cu,Cap,Tc,Tcv,Y,itermax, tempolimit);  
  Variáveis iter,nível, iternivelsemmelhora:inteiro;  
           fo':real; {função objetivo}  
           s':arranjo inteiro;  
  
  Início  
    Iter←0; nível←1;  
    MaxFr←nº máximo de frentes;  
    Ncam← nº total de caminhões;  
    Enquanto (iter < itermax e tempo de processamento < tempolimit) faça  
      Iternivelsemmelhora←0;  
      Repita  
        s' ← s;  
        fo' ← fo;  
        perturbação(s',nível,Qu,N,Y,Cap,Cu);  
        buscalocal_descidas(fo',s',Qu,N,Y,Cap,Cu);  
        se fo' < fo  
          então fo ← fo';  
              nível ← 1;  
              iternivelsemmelhora ← 0;  
              iter ← 0;  
              s ← s';  
          senão iternivelsemmelhora ← iternivelsemmelhora + 1;  
        fim-se;  
      até (iternivelsemmelhora > (10/100 * MaxFr* Ncam) );  
      nível ← nível + 1;  
      iter ← iter + 1;  
    fim-enquanto;  
Fim{ ILS}
```

Figura 4.36 – *Iterated Local Search*

Na adaptação proposta para o ILS, o método parte de uma solução inicial gerada conforme seção 4.3.3 e pára quando um tempo limite de processamento é alcançado ou quando o número de iterações atingir um valor limiar (*Itermax*). Para cada iteração, faz-se uma “perturbação” na solução corrente e, logo após, uma “busca local”. Em seguida, verifica-se se houve melhora no valor da função de avaliação (critério de aceitação). Em havendo, guarda-se esta solução como a melhor até o presente momento e volta-se ao

menor nível de perturbação. Não havendo, a solução não é armazenada e, neste caso, aplica-se a perturbação no nível corrente à solução atual até que não haja melhora no valor da função de avaliação (no caso, 10% do resultado de “nº de frentes $\times$ nº de caminhões”). Decorrido esse número de iterações sem melhora, o nível de perturbação é incrementado.

A Figura 4.37 ilustra o pseudocódigo referente aos níveis de perturbação aplicados ao método ILS descrito anteriormente.

Procedimento Perturbação(S',nível,Qu,N,Y,Cu,Cap);

Início

Caso nível seja

- 1: perturbação_cr(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 2: perturbação_n1(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 3: perturbação_n2(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 4: perturbação_nv(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 5: perturbação_n3(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 6: perturbação_acr(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 7: perturbação_ad(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 8: perturbação_ad(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 9: perturbação_ad(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- 10: perturbação_ad(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);

senão

- perturbação_n2(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);
- perturbação_n3(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);

fim-caso;

Fim{ Perturbação }

Figura 4.37 – Níveis de perturbação do ILS

O procedimento “Perturbação” desenvolvido no método ILS e descrito anteriormente consiste na aplicação de vários níveis de perturbação, as quais são dispostas de forma que as de menores índices são as mais fracas no sentido de complexidade computacional. Após a aplicação da perturbação de nível 10 são aplicadas consecutivamente as perturbações perturbação_n2 e perturbação_n3, as quais estabelecem um mecanismo de diversificação para o algoritmo.

As figuras 4.38 a 4.44 ilustram os pseudocódigos referentes à cada nível de perturbação.

A Figura 4.38 mostra o pseudocódigo referente ao nível 1 de perturbação.

Procedimento Perturbação_cr(S',Qu,N,Y,Cu,Cap); Início { Perturbação: desativar uma carregadeira} movimento_desativar1_carregadeira(s',Qu,N,Y, Cu,Cap); Fim{ Perturbação_cr }
--

Figura 4.38 – Perturbação desativar uma carregadeira

A perturbação de nível 1 consiste em aplicar o movimento desativar uma carregadeira. A perturbação gerada é resultante da aplicação deste movimento.

A Figura 4.39 mostra o pseudocódigo referente ao nível 2 de perturbação.

Procedimento Perturbação_n1(S',Qu,N,Y, Cu,Cap); Var x:inteiro; Início { Perturbações: 1- tirar uma viagem; 2- tirar duas viagens; 3- realocar uma viagem mantendo a frente; 4- realocar uma viagem mantendo o caminhão; } x ← aleatório(4); Caso x seja 1: movimento_tirar1_viagem(s',Qu,N,Y, Cu,Cap); 2: movimento_tirar2_viagens(s',Qu,N,Y, Cu,Cap); 3: movimento_realocar1_viagem_mf(s',Qu,N,Y, Cu,Cap); 4: movimento_realocar1_viagem_mc(s',Qu,N,Y, Cu,Cap); fim-caso; Fim{ Perturbação_n1 }

Figura 4.39 – Perturbação_n1

A perturbação de nível 2 consiste em aplicar um dos 4 movimentos a seguir: (a) tirar uma viagem; (b) tirar duas viagens; (c) realocar uma viagem mantendo a frente e (d) realocar uma viagem mantendo o caminhão. Em seguida, é gerado um número (entre 1 e 4) aleatoriamente referente a um dos movimentos citados acima. A perturbação gerada é resultante da aplicação do movimento escolhido.

A Figura 4.40 mostra o pseudocódigo referente ao nível 3 de perturbação.

```
Procedimento Perturbação_n2(S',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
  Var x:inteiro;  
  Início  
    {Perturbações:  
      1- tirar uma viagem, duas vezes;  
      2- tirar duas viagens, duas vezes;  
      3- realocar uma viagem mantendo a frente, duas vezes;  
      4- realocar uma viagem mantendo o caminhão, duas vezes; }  
    x ← aleatório(4);  
    Caso x seja  
      1: movimento_tirar1_viagem_2x(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
      2: movimento_tirar2_viagens_2x (s',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
      3: movimento_realocar1_viagem_mf_2x (s',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
      4: movimento_realocar1_viagem_mc_2x (s',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
    fim-caso;  
  Fim{ Perturbação_n2 }
```

Figura 4.40 – Perturbação_n2

A perturbação de nível 3 consiste em se aplicar um dos 4 movimentos a seguir: (a) tirar uma viagem (duas vezes); (b) tirar duas viagens (duas vezes); (c) realocar uma viagem mantendo a frente (duas vezes) e (d) realocar uma viagem mantendo o caminhão (duas vezes). Em seguida, é gerado aleatoriamente um número entre 1 e 4 referente a um dos movimentos citados acima. A perturbação gerada é resultante da aplicação do movimento escolhido.

A Figura 4.41 mostra o pseudocódigo referente ao nível 4 de perturbação.

```
Procedimento Perturbação_nv(S',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
  Início  
    {Perturbação: tirar viagens}  
    movimento_tirar_viagens(s',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
  Fim{ Perturbação_nv }
```

Figura 4.41 – Perturbação tirar todas as viagens

A perturbação de nível 4 consiste em aplicar o movimento tirar todas as viagens. A perturbação gerada é resultante da aplicação deste movimento.

A Figura 4.42 mostra o pseudocódigo referente ao nível 5 de perturbação.

```
Procedimento Perturbação_n3(S',Qu,N,Y, Cu,Cap);  
  Var  $k,k',l$ ,aux:inteiro;  
Início  
  {movimento utilizado: realocar uma carregadeira, mudando a frente}  
  repita  
     $k \leftarrow \text{aleatório}(\text{maxFr})$ ;  
  até  $y[k] <> -1$ ; {existir carregadeira alocada e ativa}  
  repita  
     $k' \leftarrow \text{aleatório}(\text{maxFr})$ ;  
  até  $k <> k'$ ;  
  {troca viagens}  
  para  $l \leftarrow 1$  até Ncam faça  
    aux  $\leftarrow n[k,l]$ ;  
     $n[k,l] \leftarrow n[k',l]$ ;  
     $n[k',l] \leftarrow \text{aux}$ ;  
  fim para  
  {troca carregadeiras}  
  aux  $\leftarrow y[k]$ ;  
   $y[k] \leftarrow y[k']$ ;  
   $y[k'] \leftarrow \text{aux}$ ;  
  Gera_nova_massa_lavrável;  
  Gera_novo_tempo_por_caminhão;  
  Gera_total_massa_lavrável;  
  Calcula_novas_percentagens;  
Fim{ Perturbação_n3 }
```

Figura 4.42 – Perturbação_n3

A perturbação de nível 5 consiste em se aplicar o movimento “realocar uma carregadeira, mudando a frente”.

Nessa perturbação, geram-se inicialmente duas frentes k e k' , sendo k diferente de k' . É necessário que exista carregadeira alocada e ativa pelo menos na frente k . Em seguida, faz-se a realocação das viagens e das carregadeiras.

A Figura 4.43 mostra o pseudocódigo referente ao nível 6 de perturbação.

Procedimento Perturbação_acr(S',Qu,N,Y, Cu,Cap); Início { Perturbação: ativar uma carregadeira} movimento_ativar1_carregadeira(s',Qu,N,Y, Cu,Cap); Fim{ Perturbação_acr }

Figura 4.43 – Perturbação ativar uma carregadeira

A perturbação de nível 6 consiste em aplicar o movimento ativar uma carregadeira. A perturbação gerada é resultante da aplicação deste movimento.

A Figura 4.44 mostra o pseudocódigo referente aos nível 7, 8, 9 e 10 de perturbação.

Procedimento Perturbação_ad(S',Qu,N,Y, Cu,Cap); Início { Perturbação: trocar uma carregadeira ativa por uma inativa invertendo as funções} movimento_trocar_carregadeira(s',Qu,N,Y, Cu,Cap); Fim{ Perturbação_ad }

Figura 4.44 – Perturbação trocar carregadeira ativa/inativa

As perturbações de nível 7, 8, 9 e 10 consistem em aplicar o movimento trocar uma carregadeira ativa por uma inativa de capacidade de produção maior. A perturbação gerada é resultante da aplicação deste movimento.

A Figura 4.45 ilustra o pseudocódigo referente ao método de busca local (VND) usado para refinar uma solução do método ILS.

```

Procedimento VND(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
  Var k, nv:inteiro;
      fo'':real;
Início
  k ← 1;
  nv ← 8; {quantidade de descidas}
  fo'' ← fo';
  enquanto k <= nv faça
    caso k seja
      1:Descida_tirar1_viagem(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
      2:Descida_tirar_viagens(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
      3:Descida_inserir1_viagem(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
      4:Descida_realocar1_viagem_mf(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
      5:Descida_realocar1_viagem_mc(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
      6:Descida_realocar1_carregadeira(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
      7:Descida_desativar1_carregadeira(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
      8:Descida_tirar2_viagens(fo',S',Qu,N,Y, Cu,Cap);
    fim caso;
  // VND
  se fo' < fo''
    então k ← 1;
        fo'' ← fo';
    senão k ← k + 1;
  fim se;
  fim enquanto;
Fim{ VND }

```

Figura 4.45 – Algoritmo VND

Nesse procedimento são executados oito tipos diferentes de busca local, todos já descritos no item 4.3.6:

- (a) descida_tirar1_viagem;
- (b) descida_tirar_viagens;
- (c) descida_inserir1_viagem;
- (d) descida_realocar1_viagem_mf;
- (e) descida_realocar1_viagem_mc;
- (f) descida_realocar1_carregadeira;
- (g) descida_desativar1_carregadeira;
- (h) descida_tirar2_viagens.

4.4 Implementação Computacional

O algoritmo proposto foi implementado em Delphi, versão 7.0, interfaceando com planilhas do Excel. Mostram-se, a seguir, as principais telas do sistema desenvolvido.

4.4.1 Tela de abertura

Problema da Mistura de Minério

Teores

Elem	Fe (%)	Al2O3 (%)	P (%)	PPC (%)	He (%)
Frente1	52,64	0,52	0,084	4,48	45
Frente2	39,92	0,18	0,029	0,65	97
Frente3	47,19	0,5	0,05	2,52	52
Frente4	49,36	0,22	0,039	1,74	78
Frente5	43,94	0,46	0,032	2,36	41
Frente6	48,97	0,54	0,057	4,34	90
Frente7	47,46	0,2	0,047	5,07	9
Frente8	46,52	0,32	0,039	3,51	4
Frente9	56,09	0,95	0,059	4,1	80
Frente10	46	0,26	0,031	2,51	21
Frente11	49,09	0,22	0,04	4,2	12
Frente12	49,77	0,2	0,047	4,81	12
Frente13	53,03	0,24	0,047	4,17	1
Frente14	52,96	0,29	0,052	4,81	1
Frente15	42,09	0,17	0,031	1,38	47

Elementos

Fe Al2O3 P PPC He

Cálculos **Ver tabelas**

Sair

Figura 4.46 – Tela de abertura do sistema

A Figura 4.46 mostra a tela de abertura do sistema. No exemplo considerado, há 15 frentes de lavra, sendo 11 de minério e 4 de estéril. Esses dados são digitados diretamente numa planilha no software Excel que interage com o Delphi.

Nesta Figura são mostrados os teores de cada parâmetro nas diversas frentes de lavra. Por ela, observa-se, por exemplo, que na frente 2 o teor de ferro (Fe) é de 39,92% e na frente 9 é de 56,09%.

4.4.2 Tela principal do sistema

A Figura 4.47 mostra a tela com os parâmetros do método e alguns resultados, como o cálculo da produção de minério e também de estéril, o cálculo das percentagens de cada parâmetro de controle e as diferenças, em toneladas, em relação à meta.

Meta(t): 4000 **Minério: soma =** 4000 **4000**

Meta(t): 1200 **Diferença =** 0 **0**

Meta(t): Estéril **Estéril: soma =** 1200 **1200**

Taxa de utilização (%): 0 **Diferença =** 0 **0**

sem taxa de utilização de caminhões

Elem - teores

01 -	52,64	0,52	0,084	4,48	45
02 -	39,92	0,18	0,029	0,65	97
03 -	47,19	0,5	0,05	2,52	52
04 -	49,36	0,22	0,039	1,74	78
05 -	43,94	0,46	0,032	2,36	41
06 -	48,97	0,54	0,057	4,34	90

	Meta (%)	Peso Critério	Peso Comparação	% Calculada	Diferença em relação à meta (t)	Desvio * Difer.(t)
Fe	47	5	1	47,9825	-39,3000000000001	196,5
Al2O3	0,32	1	100	0,3175	0,1	10
P	0,040	100	1000	0,04195	-0,078	7800
PPC	2,35	10	100	2,91375	-22,55	22550
He	40	1	1	37,95	81,9999999999999	81,9999999999999

Quantidade (Qu) máxima (t) existente em cada frente (1-minério; 0-estéril): **Total:** 30638,5

Frente1	1500	1	Frente5	1250	0	Frente9	1990	1	Frente13	1320	1
Frente2	2000	0	Frente6	1890	1	Frente10	900	0	Frente14	1245	1
Frente3	1700	1	Frente7	1640	1	Frente11	1540	1	Frente15	1859	0
Frente4	1450	1	Frente8	1124	1	Frente12	1630	1			

obs.: Peso Critério : Peso Comparação

Irrelevante:	0	1	10	100
Importante:	1			
Muito Importante:	5	1000	10000	
Crítico:	10			
Muito Crítico:	100			

Obs.: **Desvio=Critério * Comparação**

Calcula **fo** **Limpar** **Sair** **Volta**

Figura 4.47 – Tela principal

Em relação aos parâmetros do método, destacam-se as metas de minério e de estéril que, no exemplo considerado, são de 4000 t e 1200 t, respectivamente, e as metas de qualidade (Fe=47%, Al_2O_3 =0,32%, P=0,040%, PPC=2,35%, He=40%).

São apresentadas também, nesta tela, as quantidades iniciais de minério ou estéril existente em cada frente, bem como o tipo de frente (1=minério; 0=estéril) e os pesos adotados para se calcular as penalidades no caso do não atendimento às metas de qualidade.

4.4.3 Tela de relatório das soluções inicial e final

A Figura 4.48 mostra a tela com a alocação das carregadeiras nas diversas frentes, bem como a tonelagem máxima a ser retirada de cada uma delas tanto para a solução inicial e final da heurística.

Relatório					
Solução inicial (So)					
Frente	Carreg		Carreg		Carreg
1: 0	0	6: 0	4	11: 900	1
2: 250	3	7: 0	0	12: 0	2
3: 1000	6	8: 0	0	13: 1000	7
4: 1100	8	9: 0	0	14: 0	0
5: 0	0	10: 0	0	15: 950	5
fo = 49542,85					
Solução final (s)					
Frente	Carreg		Carreg		Carreg
1: 0	0	6: 0	4	11: 800	1
2: 300	3	7: 0	0	12: 0	2
3: 1000	6	8: 1100	7	13: 0	0
4: 1100	8	9: 0	0	14: 0	0
5: 0	0	10: 0	0	15: 900	5
fo = 30638,5					
					

Figura 4.48 – Tela das soluções inicial e final

É mostrado na Figura 4.48 que, na frente 11, deveriam ser retiradas 900 t de minério pela carregadeira 1, inicialmente. Já na solução final, o método propõe que sejam retiradas 800 t de minério pela carregadeira 1.

A melhoria da solução pode ser constatada pelo valor da função objetivo (fo), que na solução inicial era de 49.542,85 e na solução final é de 30.638,5, nesse exemplo.

4.4.4 Tela de relatório do número de viagens de cada caminhão

A Figura 4.49 mostra a tela com o número de viagens de cada caminhão, por frente, o número total de viagens de cada caminhão, o total de viagens considerando todos os caminhões, o tempo acumulado de viagem para cada caminhão e a taxa de utilização de cada caminhão.

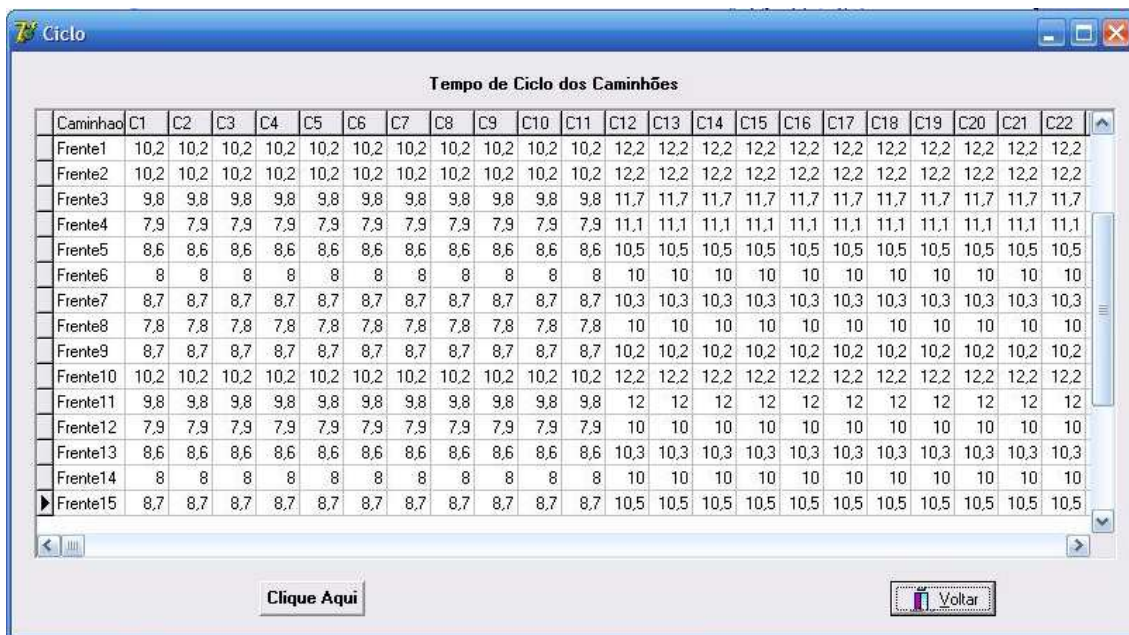
A Figura 4.49 mostra o caminhão 29 fazendo 3 viagens à frente 3, totalizando 35,10 minutos de percurso com 58,50% de taxa de utilização.

CAMINHÕES																N.Viag	Tempo	Util(%)
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15			
CAM1			3	1						1						5	47,50	79,17
CAM2		1		3												4	33,90	56,50
CAM3				4				2								6	47,20	78,67
CAM4		3		1						1						5	48,70	81,17
CAM5		4	1													5	50,60	84,33
CAM6		3								2						5	51,00	85,00
CAM7				1				2		1						4	33,70	56,17
CAM8		2		1						2						5	48,70	81,17
CAM9		1		4				1								6	49,60	82,67
CAM10		3		1												4	38,50	64,17
CAM11			2					3								5	43,00	71,67
CAM12								5								5	50,00	83,33
CAM13				2				2								4	42,20	70,33
CAM14								5								5	50,00	83,33
CAM15				4												4	44,40	74,00
CAM16																0	0,00	0,00
CAM17																0	0,00	0,00
CAM18																0	0,00	0,00
CAM19																0	0,00	0,00
CAM20			2								2					4	47,40	79,00
CAM21																0	0,00	0,00
CAM22			1								3					4	47,70	79,50
CAM23			3								1					4	47,10	78,50
CAM24											3					3	36,00	60,00
CAM25																0	0,00	0,00
CAM26			1								1					2	23,70	39,50
CAM27																0	0,00	0,00
CAM28																0	0,00	0,00
CAM29			3													3	35,10	58,50
CAM30																0	0,00	0,00
Total																92		72,70

Figura 4.49 – Tela do número de viagens de cada caminhão

4.4.5 Tela do Tempo de Ciclo dos Caminhões

A Figura 4.50 mostra a tela com o tempo de ciclo dos caminhões em cada frente.



Caminhão	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Frente1	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
Frente2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
Frente3	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Frente4	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
Frente5	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Frente6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Frente7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Frente8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Frente9	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
Frente10	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
Frente11	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Frente12	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Frente13	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
Frente14	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Frente15	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5

Figura 4.50 – Tela do tempo de ciclo dos caminhões

A Figura 4.50 mostra que na frente 7, o tempo de ciclo do caminhão 11 é 8,7 minutos. Os dados dessa tabela são lidos diretamente de uma planilha em Excel.

4.4.6 Tela de Compatibilidade entre Caminhões e Carregadeiras

A Figura 4.51 mostra a tela com a compatibilidade entre caminhões e carregadeiras.

Compatibilidade

Compat	Cam1	Cam2	Cam3	Cam4	Cam5	Cam6	Cam7	Cam8	Cam9	Cam10	Cam11	Cam12	Cam13	Cam14	Cam15	Cam16	Cam17
Car1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Car2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Car3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Car4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Car5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Car6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Car7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Car8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Clique Aqui Voltar

Figura 4.51 – Tela de compatibilidade entre caminhões e carregadeiras

Na Figura 4.51, o número 1 significa que a carregadeira e o caminhão são compatíveis e 0, caso contrário. Assim, mostra-se nesta Figura que a carregadeira 4 é compatível com o caminhão 1.

4.4.7 Tela com a Capacidade Máxima de cada Caminhão.

A Figura 4.52 mostra a tela com a capacidade máxima de cada caminhão.

Capacidades

Caminhões

Capac	Cam1	Cam2	Cam3	Cam4	Cam5	Cam6	Cam7	Cam8	Cam9	Cam10	Cam11	Cam12	Cam13	Cam14	Cam15	Cam16
(t)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	80

Clique Aqui Voltar

Figura 4.52 – Tela com a capacidade máxima de cada caminhão

A Figura 4.52 mostra que o caminhão 7 tem capacidade de 50 toneladas. Esses dados são disponibilizados por uma planilha em Excel.

4.4.8 Tela com a Capacidade Mínima de cada Carregadeira.

A Figura 4.53 mostra a tela com a capacidade mínima de cada carregadeira.



The screenshot shows a window titled "Capacidades Mínimas" with a table of minimum capacities for eight loaders. The table has columns for "Cgmi", "Car1", "Car2", "Car3", "Car4", "Car5", "Car6", "Car7", and "Car8". The row for "Min" shows values: 250, 300, 250, 300, 350, 300, 400, and 400. Below the table are two buttons: "Clique Aqui" and "Voltar".

Cgmi	Car1	Car2	Car3	Car4	Car5	Car6	Car7	Car8
▶ Min	250	300	250	300	350	300	400	400

Clique Aqui Voltar

Figura 4.53 – Tela com a capacidade mínima de cada carregadeira

A Figura 4.53 mostra que a carregadeira 1 para ser colocada em operação deve atingir um mínimo de 250 toneladas por hora.

4.4.9 Tela com a Capacidade Máxima de cada Carregadeira.

A Figura 4.54 mostra a tela com a capacidade máxima de cada carregadeira.



Figura 4.54 – Tela com a capacidade máxima de cada carregadeira

A Figura 4.54 mostra que a carregadeira 7 trabalhará com um máximo de 1100 toneladas por hora.

5. Resultados Computacionais

5.1 Introdução

O algoritmo heurístico proposto foi desenvolvido na linguagem visual Delphi, versão 7 e o modelo de programação matemática, adaptado de Costa *et al.* (2004), foi implementado no modelador e otimizador LINGO, versão 10.0. Ambos foram testados em um PC com processador AMD Turion64 Mobile, Technology MK-36, 2,01 GHz, com 1 GB de RAM.

Foram considerados 8 problemas-teste, todos envolvendo 5 parâmetros de controle (Fe, Al_2O_3 , P, PPC, He), 15 frentes de lavra, sendo 11 de minério e 4 de estéril, com 30 caminhões e 8 carregadeiras disponíveis. Cada problema-teste representa um cenário diferente de uma mineração de ferro da região de Ouro Preto e Mariana, em Minas Gerais, conforme Tabela 5.1 a seguir.

Tabela 5.1 – Problemas-teste

	Problema-teste	Cenário
1	F15_M11_E4_V30_C8.1	Base
2	F15_M11_E4_V30_C8.2	Base, impondo taxa de utilização de caminhões de até 85%
3	F15_M11_E4_V30_C8.3	Base, sem limite mínimo para carregadeiras
4	F15_M11_E4_V30_C8.4	Cenário 3 com taxa de utilização de caminhões de até 85%
5	F15_M11_E4_V30_C8.5	Base, com compatibilidade total entre caminhões e carregadeiras
6	F15_M11_E4_V30_C8.6	Cenário 5, com taxa de utilização de caminhões de até 85%
7	F15_M11_E4_V30_C8.7	Base, com compatibilidade total entre caminhões e carregadeiras e sem limite mínimo para carregadeiras
8	F15_M11_E4_V30_C8.8	Cenário 7, com taxa de utilização de até 85%

Na Tabela 5.1, cada problema-teste é da forma FX_MY_EZ_VT_CK.W, onde X representa o número de frentes de lavra, Y o de frentes de minério, Z o de frentes de estéril, T o número de caminhões, K o número de carregadeiras e W o cenário.

Como referência para os demais, o cenário 1 (base) leva em consideração a compatibilidade entre caminhões e carregadeiras, o limite mínimo para as carregadeiras e a não observância da taxa de utilização de caminhões.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as metas de produção e qualidade, bem como o número de equipamentos disponíveis e as prioridades de cada parâmetro de controle de qualidade. Nesta tabela, %Fe, %Al₂O₃, %P, %PPC e %He representam, respectivamente, os percentuais de ferro, alumina, fósforo, perda por calcinação e hematita especulada, os quais representam os parâmetros de controle. Minério (t) e Estéril (t) representam, respectivamente, as metas de produção de minério e estéril, em toneladas. Cam representa o número de caminhões e Carreg, o número de carregadeiras. Cada parâmetro de controle é classificado em cinco níveis de importância: IR (irrelevante), I (importante), MI (muito importante), C (crítico) e MC (muito crítico).

Tabela 5.2 – Metas de produção e qualidade, número de equipamentos disponíveis e prioridades

Item	% Fe	% Al ₂ O ₃	% P	% PPC	% He	Minério (t)	Estéril (t)	Cam.	Carreg.
Meta / # Equip.	47,000	0,320	0,040	2,350	40,000	4000	1200	30	8
Prioridade	MI	I	MC	C	I	-	-	-	-

Na Tabela 5.3 são apresentados os parâmetros usados nas execuções do algoritmo desenvolvido, os quais foram calibrados em uma bateria inicial de testes. Os pesos adotados consideram que o fósforo (P) é o parâmetro de controle mais crítico.

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados

Parâmetro	Significado	Valor
μ_A	Penalidade por ultrapassar a taxa máxima de utilização de um caminhão	1.000.000
μ_B	Penalidade por não atingir a taxa máxima de utilização de um caminhão	100
ω	Penalidade pela utilização de um caminhão	1
λ	Penalidade pela produtividade da carregadeira ficar abaixo da mínima exigida	10
ϕ	Penalidade pela produtividade da carregadeira ter ficado acima da máxima imposta	1
α_j^q	Penalidade por não atendimento à meta de qualidade do j -ésimo parâmetro de controle	$\alpha_{Fe}^q = 5$ $\alpha_{Al_2O_3}^q = 100$ $\alpha_P^q = 100.000$ $\alpha_{PPC}^q = 1.000$ $\alpha_{He}^q = 1$
β, γ	Penalidade por não atendimento à meta de produção de minério e estéril, respectivamente	2.000.000
<i>IterConstr</i>	Número de aplicações do método de construção da solução inicial	100
<i>IterMax</i>	Número máximo de iterações sem melhora do ILS	50
<i>NivelMax</i>	Número máximo de níveis de perturbação do ILS	10
<i>NumMaxVezes</i>	Número máximo de vizinhos avaliados em um dado nível de perturbação	10% do número de frentes $\times$ número de caminhões

5.2 Resultados obtidos

Os dados de cada cenário foram submetidos a dez execuções do algoritmo proposto. Para as tabelas apresentadas a seguir, foram adotadas as seguintes notações: Fe (ferro), Al_2O_3 (alumina), P (fósforo), PPC (perda por calcinação), He (Hematita especulada), minério (quantidade em toneladas de minério), estéril (quantidade em toneladas de estéril), fo (função de avaliação, calculada conforme equação 4.26, seção 4.3.4), carregadeiras (número total de carregadeiras), caminhões (número total de caminhões), viagens (número total de viagens), tempo (tempo de execução em segundos), TxUtil (taxa de utilização média de caminhões, sendo a taxa de utilização de cada caminhão calculada conforme equação 4.33).

As características da melhor solução obtida para cada cenário são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Características dos melhores resultados obtidos

	Cenários							
	1	2	3	4	5	6	7	8
% Fe	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825	47,9889	47,9825	47,9825	47,9825
% Al_2O_3	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3172	0,3175	0,3175	0,3175
% P	0,0419	0,0419	0,0419	0,0419	0,0419	0,0419	0,0419	0,0419
% PPC	2,9137	2,9137	2,9137	2,9137	2,9154	2,9137	2,9137	2,9137
% He	37,95	37,95	37,95	37,95	37,97	37,95	37,95	37,95
minério(t)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
estéril (t)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Fo	30.630,50	30.583,83	30.626,50	30.577,83	30.710,98	30.615,16	30.632,10	30.594,76
carregadeiras	6	6	6	6	7	6	6	6
caminhões	27	20	26	21	28	21	24	21
viagens	89	92	92	89	86	89	89	89
Tempo(s)	62	161	67	216	143	171	121	177
% TxUtil	54,19	76,98	58,78	73,13	52,73	71,81	59,56	72,18

A Tabela 5.5 mostra, em cada célula, o desvio percentual encontrado para cada parâmetro de controle referente à melhor solução obtida, tendo em vista as metas estabelecidas. O desvio é calculado com base na expressão:

$$DesvioMeta = \frac{Encontrado - Meta}{Meta}$$

em que *Encontrado* representa o valor encontrado para o parâmetro de controle e *Meta* representa a meta estabelecida para o respectivo parâmetro de controle.

Tabela 5.5 – Desvios percentuais dos parâmetros de controle da melhor solução em relação às metas estabelecidas

Cenários								
	1	2	3	4	5	6	7	8
% Fe	2,09	2,09	2,09	2,09	2,10	2,09	2,09	2,09
% Al ₂ O ₃	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,88	-0,78	-0,78	-0,78
% P	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
% PPC	23,99	23,99	23,99	23,99	24,06	23,99	23,99	23,99
% He	-5,12	-5,12	-5,12	-5,12	-5,08	-5,12	-5,12	-5,12
minério(t)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
estéril (t)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Na Tabela 5.6 são apresentados os valores médios obtidos nas dez execuções do algoritmo para cada cenário.

Tabela 5.6 – Valores médios obtidos

Cenários								
	1	2	3	4	5	6	7	8
% Fe	48,0294	48,0418	47,9974	48,0044	48,0026	47,9942	47,9891	48,0008
% Al ₂ O ₃	0,3164	0,3165	0,3169	0,3179	0,3165	0,3163	0,3169	0,3168
% P	0,0419	0,0420	0,0419	0,0420	0,0419	0,0419	0,0419	0,0419
% PPC	2,9241	2,9227	2,9205	2,9132	2,9248	2,9226	2,9179	2,9212
% He	37,8053	38,0143	37,7995	38,2775	37,9240	37,7885	37,8855	37,9420
minério(t)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
estéril (t)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Fo	31.207,84	31.234,70	31.057,22	30.862,02	31.074,52	30.850,68	30.752,01	30.929,69
carregadeiras	6,4	6,3	6,3	6	6,5	6,5	6,4	6,2
caminhões	26,6	20,9	25	20,6	26,8	21,5	26,5	21,1
Viagens	89,6	90,2	91,1	90,5	87,2	89	88,4	88,4
tempo(s)	78,9	148,3	70,3	151,2	109,9	185,9	110,2	211,7
% TxUtil	55,951	72,909	60,361	74,381	54,342	69,911	55,249	71,126

A Tabela 5.7 mostra, em cada célula, o desvio percentual encontrado para cada elemento de avaliação da Tabela 5.6. O desvio é calculado com base na expressão:

$$Desvio = \frac{Média - Melhor}{Melhor}$$

em que *Média* representa o valor médio encontrado nas dez execuções do método e *Melhor* representa o melhor valor encontrado nessas execuções.

Tabela 5.7 – Desvios percentuais encontrados para algumas características das soluções.

Cenários								
	1	2	3	4	5	6	7	8
fo	1,88	2,13	1,41	0,93	1,18	0,77	0,39	1,09
carregadeiras	6,67	5,00	5,00	0,00	-7,14	8,33	6,67	3,33
caminhões	-1,48	4,50	-3,85	-1,90	-4,29	2,38	10,42	0,48
viagens	0,67	-1,96	-0,98	1,69	1,40	0,00	-0,67	-0,67
% TxUtil	3,25	-5,29	2,69	1,71	3,06	-2,64	-7,24	-1,46

Na Tabela 5.7, um valor negativo para um elemento de avaliação indica que na melhor solução, esse elemento de avaliação é pior que o valor da solução média. Por exemplo, para o cenário 1, a média de caminhões utilizados foi de 26,6 e o número de caminhões utilizados considerando a melhor solução obtida, foi de 27, o que proporcionou um desvio de -1,48%. Neste mesmo cenário, no entanto, necessitou-se de 6 carregadeiras na melhor solução, enquanto que na solução média foram necessárias 6,4 carregadeiras, mostrando que com relação a este item de avaliação, a melhor solução é cerca de 6,67% melhor que a da solução média.

De forma a comparar o desempenho do método heurístico proposto com o método de programação matemática, para cada cenário, executou-se o otimizador LINGO, versão 10.0, sobre o modelo de programação matemática da seção 4.2, interrompendo-se a execução em duas situações: (1) decorrido o tempo gasto pelo ILS para gerar a melhor solução em cada cenário, tempo esse dado pela Tabela 5.4; (2) decorrido o tempo médio de processamento requerido pelo método heurístico, dado pela Tabela 5.6. Esta comparação se justifica uma vez que o tempo para a tomada de decisão

é relativamente curto, da ordem de minutos, compatíveis com os tempos demandados pelo ILS.

As características da solução obtida pelo otimizador para cada cenário na primeira opção, isto é, decorrido o tempo gasto pelo ILS para gerar a melhor solução, são apresentadas na Tabela 5.8. Já na segunda opção, são apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 – Características das soluções do otimizador no tempo da melhor solução do ILS

Cenários								
	1	2	3	4	5	6	7	8
% Fe	47,9825	47,9889	47,9825	47,9825	47,9825	47,9937	47,9825	47,9883
% Al ₂ O ₃	0,3175	0,3173	0,3175	0,3175	0,3175	0,3166	0,3175	0,3173
% P	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04193	0,04195	0,04196
% PPC	2,91375	2,91548	2,91375	2,91375	2,91375	2,91968	2,91375	2,92163
% He	37,95	37,97	37,95	37,95	37,95	37,87	37,95	37,81
minério(t)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Estéril (t)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Fo	30.638,50	30.812,70	30.638,50	30.655,50	30.638,50	30.811,74	30.638,50	31.002,45
carregadeiras	6	6	7	6	8	6	7	6
Caminhões	19	17	17	17	18	17	16	20
Viagens	86	71	86	71	89	71	86	71
Tempo(s)	62	161	67	216	143	171	121	177
% TxUtil	76,44	73,50	82,46	72,44	78,87	72,89	85,67	62,54

Tabela 5.9 – Características das soluções do otimizador no tempo médio do ILS

Cenários								
	1	2	3	4	5	6	7	8
% Fe	47,9825	47,9937	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825
% Al ₂ O ₃	0,3175	0,3166	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175
% P	0,04195	0,04193	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195
% PPC	2,91375	2,91968	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375
% He	37,95	37,87	37,95	37,95	37,95	37,95	37,95	37,95
minério(t)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Estéril (t)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Fo	30.638,5	30.737,99	30.638,50	30.659,5	30.638,5	30.659,50	30.638,50	30.655,5
carregadeiras	8	6	7	6	6	6	7	8
Caminhões	16	19	17	20	16	20	16	17
Viagens	89	74	86	74	89	74	86	71
Tempo(s)	78,9	148,3	70,3	151,2	109,9	185,9	110,2	211,7
% TxUtil	88,54	67,19	82,46	62,96	89,38	63,11	85,67	73,11

A Tabela 5.10 mostra, para cada cenário, o percentual de melhora proporcionado pelo método heurístico ILS, em seu melhor comportamento (Tabela 5.4), comparado com a solução produzida pelo otimizador LINGO no mesmo tempo de processamento do ILS. O percentual de melhora é calculado com base na expressão:

$$GanhoMelhor = \frac{LINGO - MelhorILS}{LINGO}$$

em que *MelhorILS* representa o melhor valor da função de avaliação (fo) encontrado nas dez execuções do método ILS e *LINGO* representa o resultado encontrado pelo otimizador LINGO no mesmo tempo de processamento do ILS (vide Tabela 5.4).

Tabela 5.10 – Percentual de melhora do ILS em relação ao LINGO no tempo da melhor solução do ILS

Item	Cenários							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>GanhoMelhor</i> (%)	0,03	0,74	0,04	0,25	-0,24	0,64	0,02	1,32
Tempo de execução (s)	62	161	67	216	143	171	121	177

Na Tabela 5.10, um valor positivo em uma célula indica que o ILS produziu uma solução de melhor qualidade que o otimizador LINGO. Por exemplo, para o cenário 2, o ILS foi 0,74% melhor que o LINGO. Já no cenário 5, a solução final do ILS foi 0,24% pior que aquela produzida pelo LINGO.

A Tabela 5.11 mostra, para cada cenário, o percentual de melhora proporcionado pelo método heurístico ILS, em seu comportamento médio (Tabela 5.6), comparado com a solução produzida pelo otimizador LINGO nesse mesmo tempo de processamento. O percentual de melhora é calculado com base na expressão:

$$GanhoMédio = \frac{LINGO^* - MédiaILS}{LINGO^*}$$

em que *MédiaILS* representa o valor médio da função de avaliação (fo) encontrado nas dez execuções do método ILS e *LINGO** representa o resultado encontrado pelo otimizador LINGO no tempo médio de processamento do ILS (vide tempos médios de processamento do ILS na Tabela 5.6).

Tabela 5.11 – Percentual de melhora do ILS em relação ao LINGO no tempo médio de processamento do ILS

Item	Cenários							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>GanhoMédio</i> (%)	-1,86	-1,62	-1,37	-0,66	-1,42	-0,62	-0,37	-0,89
Tempo de execução (s)	78,9	148,3	70,3	151,2	109,9	185,9	110,2	211,7

Na Tabela 5.11, um valor negativo em uma célula indica que o otimizador LINGO produziu uma solução de melhor qualidade que o ILS. Como se observa, o LINGO foi capaz de produzir soluções de melhor qualidade que aquelas geradas pelo algoritmo ILS, sendo que esta melhora variou entre 0,37 e 1,86%.

Para mostrar a eficiência do método ILS, foram executados testes com o otimizador de programação matemática, dando-se a este um maior tempo de processamento. A Tabela 5.12 mostra as características da solução obtida pelo otimizador de programação matemática em uma hora de processamento, enquanto a Tabela 5.13 mostra os resultados decorridos 20 horas de processamento.

Tabela 5.12 – Características das soluções obtidas pelo otimizador em uma hora de processamento

	1	2	3	4	5	6	7	8
% Fe	47,9825	47,9889	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825
% Al ₂ O ₃	0,3175	0,3173	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175
% P	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195
% PPC	2,91375	2,91548	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375
% He	37,95	37,97	37,95	37,95	37,95	37,95	37,95	37,95
minério(t)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
estéril (t)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Fo	30.638,50	30.736,99	30.638,50	30.657,50	30.638,50	30.655,50	30.638,50	30.656,50
carregadeiras	6	6	7	7	6	6	7	6
caminhões	19	18	17	19	16	17	16	18
Viagens	86	71	86	74	89	71	86	71
tempo(s)	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600
% TxUtil	74,18	69,42	82,46	66,95	89,38	73,11	85,67	69,05

Tabela 5.13 – Características das soluções obtidas pelo otimizador em 20 horas de processamento

	1	2	3	4	5	6	7	8
% Fe	47,9825	47,9889	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825	47,9825
% Al ₂ O ₃	0,3175	0,3173	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175	0,3175
% P	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195	0,04195
% PPC	2,91375	2,91548	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375	2,91375
% He	37,95	37,97	37,95	37,95	37,95	37,95	37,95	37,95
minério(t)	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
estéril (t)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Fo	30.638,50	30.735,99	30.638,50	30.655,50	30.638,50	30.655,50	30.638,50	30.655,50
carregadeiras	6	6	7	7	6	6	7	6
caminhões	19	17	17	17	16	17	16	17
Viagens	86	71	86	71	89	71	86	71
tempo(h)	20	20	20	20	20	20	20	20
% TxUtil	74,18	73,50	82,46	72,61	89,38	72,44	85,67	72,44

A Tabela 5.14 mostra, para cada cenário, a distância entre a solução do LINGO em uma hora de processamento (respectivamente, 20 horas) e a gerada pelo método heurístico ILS, em seu melhor desempenho (Tabela 5.4). Esta métrica é calculada com base na expressão:

$$Distancia = \frac{LINGO^{**}}{MelhorILS} - 1$$

em que *MelhorILS* representa o melhor valor para a função de avaliação (fo) encontrado nas dez execuções do método ILS no tempo especificado na Tabela 5.4 e *LINGO^{**}* representa o resultado encontrado pelo otimizador LINGO em uma hora de processamento (respectivamente, 20 horas).

Tabela 5.14 – Comparação entre o LINGO e o melhor desempenho do ILS

Descrição	Cenários							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Distancia (%)</i> em uma hora	0,0261	0,501	0,039	0,261	-0,236	0,132	0,021	0,201
<i>Distancia (%)</i> em 20 horas	0,0261	0,498	0,039	0,254	-0,236	0,132	0,021	0,199
Tempo ILS (s)	62	161	67	216	143	171	121	177

Na Tabela 5.14, um valor positivo em uma célula indica que o ILS produziu uma solução de melhor qualidade que o otimizador LINGO. Por exemplo, para o cenário 4, a solução do LINGO em uma hora distou da solução do ILS em 0,261% e esta distância diminuiu para 0,254% quando o LINGO foi processado em 20 horas. Como se observa, não houve melhora do LINGO nos cenários ímpares, onde não se considera a taxa de utilização máxima para os caminhões. Apenas no cenário 5, a solução do LINGO foi melhor que a do ILS.

5.3 Discussão dos resultados

Pela Tabela 5.4, verifica-se que as soluções produzidas pelo ILS são de valores muito próximos, independentemente de se considerar incompatibilidade entre

carregadeiras e caminhões e de se impor um limite mínimo de carregamento para as carregadeiras.

Impondo-se uma taxa de utilização para os caminhões (cenários 2, 4, 6 e 8), há redução significativa no número de veículos necessários para atender a produção requerida. Por exemplo, para o cenário 2 (vide Tabela 5.6), reduz-se, em relação ao cenário 1, o número de veículos necessários de 26,6 para 20,9, isto é, uma redução de cerca de 21,4% na média. Comparando-se os cenários 7 e 8, verifica-se que no cenário 8 há uma redução de 20,4% no número médio de caminhões necessários, no caso, de 26,5 caminhões para 21,1 caminhões.

Verifica-se, também, que impondo-se uma taxa máxima de 85% para a utilização dos caminhões, a utilização média de caminhões é significativamente aumentada, fazendo com que a frota seja melhor aproveitada, com baixa ociosidade. Para exemplificar, no cenário 1 a taxa de utilização média dos caminhões é de 55,951%, enquanto que no cenário 2 essa taxa aumenta para 72,909%. Deve ser ressaltado que tal taxa de utilização não é a efetiva, uma vez que não se leva em consideração tempo de fila nas frentes.

Nos cenários 2, 4, 6 e 8, onde se aplica a taxa máxima de utilização para os caminhões, percebe-se que o tempo computacional requerido para a execução do algoritmo é superior àquele encontrado nos outros cenários onde tal taxa não é aplicada. Isso é devido ao maior esforço computacional existente na execução do algoritmo quando se aplica a taxa de utilização de caminhões.

Na Tabela 5.5, observa-se que o algoritmo proposto é capaz de gerar soluções bastante próximas das metas estabelecidas. A exceção ocorre com os parâmetros de controle PPC, He e P. Por exemplo, no cenário 1, apesar de o PPC ser considerado um parâmetro crítico (com peso igual a 10), é o parâmetro de controle com maior desvio. Isso é devido, no entanto, ao fato de existir apenas uma frente de minério com menos de 2,35% (Figura 4.46: frente 4 com 1,74%), que é o valor estabelecido como meta para este parâmetro, sendo, portanto, impossível seu atendimento. Já o parâmetro de controle He com -5,12% de desvio em relação à meta estabelecida foi outro cujo desvio foi alto. Observa-se, no entanto, que tal parâmetro tem baixa prioridade, no caso, ele é

considerado com prioridade mínima (Importante, com valor 1). No caso do fósforo, P, que é o parâmetro que possui a maior prioridade, considerado Muito Crítico, com peso igual a 100, o desvio não ultrapassa 5% mas, pelos mesmos motivos elencados para o parâmetro PPC, não é possível atender a meta com os recursos minerais disponíveis. No caso do fósforo, mesmo nas melhores soluções obtidas em cada cenário (vide Tabela 5.4), não foi possível atingir a meta.

Apesar de os cenários mais favoráveis serem aqueles nos quais não há restrições de compatibilidade entre caminhões e carregadeiras e nem imposição de limite mínimo de carregamento para as carregadeiras, o método ILS proposto não explora tal característica. Isto ocorre porque a função de avaliação usada para guiar a busca procura fazer sempre o melhor aproveitamento tanto da frota de caminhões quanto das carregadeiras, penalizando uma baixa taxa de utilização de caminhões e o não atendimento do carregamento mínimo. Nas soluções produzidas pelo modelo LINGO, relativas a essas situações, aparecem taxas de utilização de caminhões de até 100% e carregamento inferior ao mínimo da carregadeira. Mesmo assim, o método ILS consegue gerar soluções ainda melhores que as produzidas pelo LINGO.

A robustez do método é confirmada pelas tabelas 5.7, 5.11 e 5.14. Pela Tabela 5.7, observa-se que o desvio na função de avaliação é baixo, inferior a 2,13%, significando que partindo de uma solução inicial qualquer, o método em geral produz uma solução final inferior a 2,13% do melhor resultado, na média. Pela Tabela 5.11 observa-se que, na média, o ILS produz soluções piores que o LINGO, quando é dado ao LINGO o tempo médio de processamento do ILS. Entretanto, é importante ressaltar que as soluções do LINGO em geral não são factíveis, como apontado no parágrafo anterior. Por outro lado, pela Tabela 5.14, que compara a distância das soluções produzidas pelo LINGO, em uma hora e 20 horas de processamento, com a melhor solução do ILS, verifica-se que o ILS gera soluções melhores, à exceção do cenário 5, apesar do pouco tempo de processamento (máximo de 216 segundos). As referidas distâncias variam de 0,021% a 0,501% quando consideradas as soluções do LINGO em uma hora de processamento. Quando o tempo dado ao LINGO é aumentado para 20 horas de processamento, tais distâncias são levemente reduzidas, variando de 0,021% a 0,498%.

6. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho tratou o problema de planejamento operacional de lavra considerando alocação dinâmica de caminhões. Dada sua dificuldade de resolução na otimalidade, foi desenvolvido um método heurístico baseado na metaheurística *Iterated Local Search* (ILS).

Para gerar uma solução inicial distribuem-se aleatoriamente carregadeiras às frentes de lavra, seguida da atribuição também aleatória de viagens aos diversos caminhões, respeitando-se a compatibilidade entre caminhões e carregadeiras. A seguir, utilizam-se dois reparadores para as inviabilidades que esta estratégia pode trazer. O primeiro reparador de inviabilidade procura solucionar o problema de a soma dos tempos de ciclo de cada caminhão superar 60 minutos, enquanto o segundo visa a respeitar a capacidade máxima da carregadeira em uma hora de produção. A essa solução gerada aplica-se um refinamento por meio do método da descida em vizinhança variável (VND), usando-se diferentes tipos de movimento para explorar o espaço de busca. Este método de construção e refinamento é aplicado certo número de vezes e a melhor solução construída é utilizada como solução inicial para o método ILS. Essa solução inicial representa um ótimo local com respeito a todas as vizinhanças consideradas, uma vez que é feita a descida completa com relação a cada vizinhança. Para escapar do ótimo local produzido pelo método VND, utilizou-se o método *Iterated Local Search* (ILS). Nesse método, cada perturbação consiste em promover modificações na solução ótima local corrente. A solução perturbada é, então, refinada pelo método VND. Havendo melhora no ótimo local corrente, move-se para a melhor solução; do contrário, aumenta-se o nível de perturbação. O nível de perturbação mais baixo indica pequenas modificações na solução ótima local corrente, enquanto níveis mais elevados consistem em promover modificações mais acentuadas na solução. O método encerra-se após um número máximo de iterações sem melhora.

Para testar o método foram utilizados 8 cenários relativo a um problema real de uma mineração de ferro. Para cada cenário, foram comparadas as soluções produzidas

pelo método ILS proposto com aquelas produzidas por um otimizador aplicado a um modelo de programação matemática desenvolvido.

Os resultados obtidos mostraram que as melhores soluções produzidas pelo método heurístico proposto (ILS) são de melhor qualidade que aquelas produzidas pelo otimizador LINGO aplicado ao modelo de programação matemática, mesmo considerando as dimensões relativamente modestas dos problemas-teste tratados.

Adicionalmente, verificou-se que as soluções de qualidade produzidas pelo ILS foram obtidas sem muito esforço computacional, ao contrário daquelas geradas pelo otimizador. Este último demandou tempos proibitivos para gerar soluções próximas àsquelas geradas pelo ILS em poucos minutos, fato que valida a utilização do método proposto, enquanto ferramenta de apoio à decisão.

Com relação às características das soluções produzidas pelo método proposto nos diversos cenários analisados, pode-se verificar que os valores dos parâmetros de controle ficaram bem próximos das metas estabelecidas. As exceções foram para o PPC e o fósforo (P), que só não obtiveram resultados melhores devido à baixa qualidade dos recursos minerais existentes para esses parâmetros. Em relação à frota de veículos de transporte e de equipamentos de carga ficou constatado o bom aproveitamento dos mesmos. No caso dos equipamentos de carga conseguiu-se reduzir a quantidade desses, bem como utilizá-los próximos de suas capacidades máximas de produção. Já no caso dos veículos de transporte, também houve redução da quantidade de veículos necessários, bem como um melhor aproveitamento desses, indicado pelas taxas de utilização próximas à meta.

Esses resultados comprovam, portanto, a eficiência do método heurístico proposto para a otimização do planejamento operacional de lavra. Destaca-se, finalmente, que o método ILS é flexível, no sentido de que outras restrições podem ser facilmente incorporadas ao método.

Em relação a Costa (2005), este trabalho representa uma evolução, no sentido de considerar número de caminhões e taxas de utilização desses no modelo de programação matemática, bem como um conjunto maior de movimentos para explorar o espaço de soluções no método heurístico. Adicionalmente, apesar de a comparação

entre os métodos não ser possível devido às características diferentes dos problemas considerados, o procedimento de geração da solução inicial aqui proposto, com os reparadores de inviabilidade, é mais eficiente, uma vez que no método de Costa (2005) a solução inicial é totalmente aleatória. Experimentos relatados na literatura mostram que os métodos heurísticos, em especial *Iterated Local Search*, são altamente dependentes da qualidade da solução inicial (Glover e Kochenberger, 2003).

Como trabalhos futuros sugere-se a incorporação da técnica Reconexão por Caminhos (*Path Relinking*), vide Glover e Kochenberger (2003), para melhorar ainda mais a qualidade das soluções produzidas. Outra proposição é a inserção do otimizador para resolver partes menores do problema. Nesse caso, de cada solução obtida pela heurística, seria escolhido certo número de frentes, carregadeiras e caminhões e submetido ao otimizador o planejamento operacional dessa parte. Caso a solução parcial obtida fosse melhor que aquela gerada pela heurística, essa solução parcial substituiria a da heurística. Para a eficiência dessa estratégia é necessário que o tempo de resolução da parte menor do problema pelo otimizador seja rápido.

Referências Bibliográficas

- ALVARENGA, G. B. (1997). *Despacho ótimo de caminhões numa mineração de ferro utilizando algoritmo genético com processamento paralelo*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. (2007). *Pesquisa Operacional para cursos de engenharia*, Editora Campus, Rio de Janeiro.
- CHANDA, E. K. C.; DAGDELEN, K. (1995). Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 9, p. 203-208.
- COSTA, F. P. (2005). *Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavras em mina a céu aberto*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 141 p.
- COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F. e PINTO, L. R. (2004). Um modelo de alocação dinâmica de caminhões, *Revista Brasil Mineral*, v. 231, p. 26-31.
- COSTA, F. P.; SOUZA, M. J. F. e PINTO, L. R. (2005). Um modelo de programação matemática para alocação estática de caminhões visando ao atendimento de metas de produção e qualidade, *Revista da Escola de Minas*, v. 58, p. 77-81.
- EZAWA, L. e SILVA, K. S. (1995). Alocação dinâmica de caminhões visando qualidade. *VI Congresso Brasileiro de Mineração*, p. 15–19, Salvador, Bahia.
- GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. (2003). *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O. C.; STÜTZLE, T. (2003). Iterated Local Search. *In Handbook of Metaheuristics*, Glover, F. and Kochenberger, G. (Eds). Kluwer Academic Publishers, Boston.

- MERSCHMANN, L. H. C. (2002). *Desenvolvimento de um Sistema de Otimização e Simulação para Cenários de Produção em Minas a Céu Aberto*, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MLADENOVIC, N. e HANSEN, P. (1997). A Variable Neighborhood Search. *Computers and Operations Research*, v. 24, p. 1097-1100.
- MORAES, E. F. (2005). *Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro na mina Cauê da CVRD*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 78 p.
- MUNIRATHINAM, M. e YINGLING, J. C. (1994). A review of computer-based truck dispatching strategies of surface mining operations, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 8, p. 1-15.
- MUTMANSKY, J. M. (1979). Computing and operations research techniques for production scheduling. *Computer methods for the 80's in the mineral industry*, p. 615–625, New York.
- PHPMETAR (2006). Pesquisa Operacional. Disponível em phpmetar.incubadora.fapesp.br/portal/Faculdade/Pesquisa%20Operacional. Acesso em 04/07/2006.
- PINTO, L.R.; MERSCHMANN, L. H. C. (2001). Planejamento operacional da lavra de mina usando modelos matemáticos. *Revista Escola de Minas*, v. 54, n. 3, p. 211-214.
- PINTO, L. R.; BIAJOLI, F. L. e MINE, O. M. (2003). *Uso de otimizador em planilhas eletrônicas para auxílio ao planejamento de lavra*. Relatório técnico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais.
- RODRIGUES, L. F. (2006). *Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, 86 p.

- SOUZA, M. J. F. (2006). Notas de aula do curso Pesquisa Operacional aplicada à Mineração. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto.
- SOUZA, M. J. F. (2007). Notas de aula da disciplina Inteligência Computacional para Otimização. Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/disciplinas/InteligênciaComputacional/InteligênciaComputacional.pdf>. Acesso em 08/05/2007.
- WHITE, J. W., ARNOLD, M. J. e CLEVINGER, J. G. (1982). Automatated open-pit truck dispatching at Tyrone, *Engineering and Mining Journal*, v. 183, n. 6, p. 76-84.
- WHITE, J. W. e OLSON, J. P. (1986). Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives. *Mining Engineering*, v. 38, n. 11, p. 1045–1054.

Anexo I: PROBLEMAS-TESTE

São caracterizados, a seguir, os dados dos problemas-teste utilizados.

- Parâmetros de Controle

	Tipo Frente	Fe (%)	Al₂O₃ (%)	P (%)	PPC (%)	He (%)	Massa (t)
Frente1	M	52,64	0,52	0,084	4,48	45,0	1500
Frente2	E	39,92	0,18	0,029	0,65	97,0	2000
Frente3	M	47,19	0,50	0,050	2,52	52,0	1700
Frente4	M	49,36	0,22	0,039	1,74	78,0	1450
Frente5	E	43,94	0,46	0,032	2,36	41,0	1250
Frente6	M	48,97	0,54	0,057	4,34	90,0	1890
Frente7	M	47,46	0,20	0,047	5,07	9,0	1640
Frente8	M	46,52	0,32	0,039	3,51	4,0	1124
Frente9	M	56,09	0,95	0,059	4,10	80,0	1990
Frente10	E	46,00	0,26	0,031	2,51	21,0	900
Frente11	M	49,09	0,22	0,040	4,20	12,0	1540
Frente12	M	49,77	0,20	0,047	4,81	12,0	1630
Frente13	M	53,03	0,24	0,047	4,17	1,0	1320
Frente14	M	52,96	0,29	0,052	4,81	1,0	1245
Frente15	E	42,09	0,17	0,031	1,38	47,0	1859

Legenda: M = minério; E = estéril; Fe = ferro; Al₂O₃ = alumina, P = fósforo, PPC = perda por calcinação; He = hematita especulada.

- Tempo de Ciclo dos Caminhões, em minutos

Fr Cam	Cam1 a Cam11	Cam12 a Cam30
Frente1	10,2	12,2
Frente2	10,2	12,2
Frente3	9,8	11,7
Frente4	7,9	11,1
Frente5	8,6	10,5
Frente6	8	10
Frente7	8,7	10,3
Frente8	7,8	10
Frente9	8,7	10,2
Frente10	10,2	12,2
Frente11	9,8	12
Frente12	7,9	10
Frente13	8,6	10,3
Frente14	8	10
Frente15	8,7	10,5

Legenda: Fr = frente; Cam = caminhão

- Capacidade dos caminhões, em toneladas

1	2	3	4	5	...	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	...	29	30
50	50	50	50	50	...	50	50	50	50	50	80	80	80	80	80	...	80	80

- Capacidade máxima e mínima das carregadeiras, em toneladas

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Max	900	900	900	900	1000	1000	1100	1100
Min	250	300	250	300	350	300	400	400

Legenda: Max = capacidade máxima; Min = capacidade mínima; c1 a c8 = carregadeiras

- Matriz de compatibilidade entre caminhões e carregadeiras

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
CAM1	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM2	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM3	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM4	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM5	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM6	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM7	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM8	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM9	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM10	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM11	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM12	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM13	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM14	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM15	1	1	1	1	1	1	1	1
CAM16	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM17	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM18	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM19	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM20	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM21	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM22	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM23	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM24	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM25	0	0	0	0	1	1	1	1

CAM26	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM27	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM28	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM29	0	0	0	0	1	1	1	1
CAM30	0	0	0	0	1	1	1	1

Legenda: c1 a c8 = carregadeiras; CAM1 a CAM30: caminhões; 0 = incompatível; 1 = compatível

Anexo II: Modelo de Programação Matemática

model:

title: Alocação Dinâmica de Caminhões;

sets:

parametros/@ole('Pilhas.xls','parametros')/:

tl, ! Teor mínimo admissível para o parâmetro j (%);

tu, ! Teor máximo admissível para o parâmetro j (%);

tr, ! Teor recomendado para o parâmetro j (%);

wnm, ! Peso por desvio negativo para o parâmetro j;

wpm, ! Peso por desvio positivo para o parâmetro j;

dnm, ! Desvio negativo de meta do parâmetro j (t/h);

dpm, ! Desvio positivo de meta do parâmetro j (t/h);

frentes/@ole('Pilhas.xls','frentes')/:

Qu, ! Massa disponível na frente i (t);

estMin, ! Se a frente i é de minério (1) ou estéril (0);

x, ! Ritmo de lavra para a frente i (t/h);

carregadeiras/@ole('Pilhas.xls','carregadeiras')/:

Cu, ! Produção máxima da carregadeira k (t/h);

Cl, ! Produção mínima da carregadeira k (t/h);

caminhoes/@ole('Pilhas.xls','caminhoes')/:

capCam, ! Capacidade do caminhão l (t);

txMax, ! Taxa de utilização máxima indicada para o caminhão l (%);

dnu, ! Desvio negativo de utilização de caminhões;

dpu, ! Desvio positivo de utilização de caminhões;

usou; ! Vale 1 se caminhão l for usado;

matriz1(frentes,parametros):

t; ! Teor do parâmetro j na frente i (%);

matriz2(frentes,carregadeiras):

y; ! Se a carregadeira k opera na frente i;

matriz3(caminhoes,carregadeiras):

comp; ! Se o caminhão l é compatível (1) ou não (0) com a carregadeira k;

matriz4(frentes,caminhoes):

n, ! Número de viagens que o caminhão l realiza a frente i;

tempCiclo; ! Tempo de ciclo do caminhão l à frente i;

endsets

data:

! Produção mínima (t/h), Produção Máxima (t/h), Produção recomendada (t/h);

pr, pe = @ole('Pilhas.xls','pr','pe');

! Penalidade para o desvio negativo de produção, Penalidade para o desvio positivo de produção;

wnp = @ole('Pilhas.xls','wnp');

```

! Teor mínimo, teor máximo, teor recomendado, teor;
tr, t = @ole('Pilhas.xls','tr','t');

! Penalidade por desvio negativo de meta de qualidade, penalidade por desvio positivo
de meta de qualidade;
wnm = @ole('Pilhas.xls','wnm');

! Massa disponível, vetor estéril/minério que vale 1 se minério e 0 se estéril;
Qu, estMin = @ole('Pilhas.xls','Qu','estMin');

! Capacidade máxima carregadeira e Capacidade mínima da carregadeira;
Cu, Cl = @ole('Pilhas.xls','Cu','Cl');

! Capacidade do caminhão, vetor de compatibilidade (vale 1 se caminhão é compatível
com carregadeira), tempo de ciclo;
capCam, comp, tempCiclo = @ole('Pilhas.xls','capCam','comp','tempCiclo');

! Taxa de utilização máxima permitida para cada caminhão ;
txMax = @ole('Pilhas.xls','txMax');

! Peso para o desvio negativo de taxa de utilização para os caminhões ;
wnu = @ole('Pilhas.xls','wnu');
enddata

[fo] min = @sum(parametros(j): wnm(j)*dnm(j) + wnm(j)*dpm(j)) +
          wnp*dnp + wnp*dpp + wnp*dne + wnp*dpe +
          @sum(caminhoes(l): usou(l));

! O teor do parâmetro j na mistura deve ser inferior ou igual ao teor máximo admitido;
@for(parametros(j): @sum(frentes(i) | estMin(i) #eq# 1: (t(i,j) - tu(j))*x(i)) <= 0);

! O teor do parâmetro j na mistura deve ser superior ou igual ao teor mínimo admitido;
@for(parametros(j): @sum(frentes(i) | estMin(i) #eq# 1: (t(i,j) - tl(j))*x(i)) >= 0);

! A meta do parâmetro j na mistura deve ser buscada sempre que possível;
@for(parametros(j): @sum(frentes(i) | estMin(i) #eq# 1: (t(i,j) - tr(j))*x(i)) + dnm(j) -
dpm(j) = 0);

! A produção total deve ser inferior ou igual à produção máxima admitida;
@sum(frentes(i) | estMin(i) #eq# 1: x(i)) <= pu;

! A produção total deve ser superior ou igual à produção mínima admitida;
@sum(frentes(i) | estMin(i) #eq# 1: x(i)) >= pl;

! A meta de produção de minério deve ser buscada sempre que possível;
@sum(frentes(i) | estMin(i) #eq# 1: x(i)) + dnp - dpp = pr;

```

! A meta de produção de estéril deve ser buscada sempre que possível;
 $\text{@sum}(\text{frentes}(i) \mid \text{estMin}(i) \neq 0: x(i)) + \text{dne} - \text{dpe} = \text{pe};$

! Deve haver no máximo uma carregadeira k operando em cada frente i;
 $\text{@for}(\text{frentes}(i): \text{@sum}(\text{carregadeiras}(k): y(i,k)) \leq 1);$

! Cada carregadeira k deve operar no máximo em uma frente i;
 $\text{@for}(\text{carregadeiras}(k): \text{@sum}(\text{frentes}(i): y(i,k)) \leq 1);$

! O ritmo de lavra da frente i deve ser maior do que a produtividade mínima da carregadeira k alocada à frente;
 $\text{@for}(\text{frentes}(i):$
 $\quad x(i) \geq \text{@sum}(\text{carregadeiras}(k): \text{Cl}(k) * y(i,k)));$

! O ritmo de lavra da frente i deve ser menor do que a produtividade máxima da carregadeira k alocada à frente;
 $\text{@for}(\text{frentes}(i):$
 $\quad x(i) \leq \text{@sum}(\text{carregadeiras}(k): \text{Cu}(k) * y(i,k)));$

! Cada caminhão l deve realizar viagens apenas à uma frente i que esteja alocada uma carregadeira compatível;
 $\text{@for}(\text{frentes}(i):$
 $\quad \text{@for}(\text{caminhoes}(l):$
 $\quad \quad n(i,l) * \text{tempCiclo}(i,l) \leq$
 $\quad \quad 60 * \text{@sum}(\text{carregadeiras}(k) \mid \text{comp}(l,k) \neq 1: y(i,k))$
 $\quad)$
 $);$

! Cada caminhão l deve operar no máximo $60 * \text{txMax}(l)$ minutos;
 $\text{@for}(\text{caminhoes}(l):$
 $\quad \text{@sum}(\text{frentes}(i): n(i,l) * \text{tempCiclo}(i,l)) \leq \text{txMax}(l) * 60);$

! O ritmo de lavra da frente i deve ser igual à produção realizada pelos caminhões alocados à frente;
 $\text{@for}(\text{frentes}(i):$
 $\quad x(i) = \text{@sum}(\text{caminhoes}(l): n(i,l) * \text{capcam}(l)));$

! A taxa de utilização de cada caminhão l deve ser de, no mínimo, $\text{txMax}(l)\%$;
 $\text{@for}(\text{caminhoes}(l):$
 $\quad \text{@sum}(\text{frentes}(i): n(i,l) * \text{tempCiclo}(i,l)) / 60 + \text{dnu}(l) = \text{txMax}(l));$

! Um caminhão l é usado se fizer alguma viagem à uma frente qualquer;
 $\text{@for}(\text{caminhoes}(l):$
 $\quad \text{usou}(l) \geq \text{@sum}(\text{frentes}(i): n(i,l) * \text{tempCiclo}(i,l)) / 60;$
 $\quad \text{@bin}(\text{usou}(l)));$

! A variável y deve ser binária;

```
@for(frentes(i): @for(carregadeiras(k): @bin(y(i,k))));
```

! O número de viagens que cada caminhão l faz à frente i (variável n) deve ser inteiro;

```
@for(frentes(i):
```

```
  @for(caminhoes(l): @gin(n(i,l))));
```

! Exporta resultados para a planilha;

```
data:
```

```
  @ole('Pilhas.xls','n')=n;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','x')=x;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','y')=y;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','dnm')=dnm;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','dpm')=dpm;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','dnp')=dnp;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','dpp')=dpp;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','dnu')=dnu;
```

```
  @ole('Pilhas.xls','usou')=usou;
```

```
enddata
```

```
end
```

Anexo III: Publicações

Os trabalhos oriundos desta pesquisa que foram submetidos a periódicos de circulação nacional e internacional e/ou apresentados em eventos são listados a seguir.

ARAÚJO, F.C.R.; SOUZA, M.J.F.; TOLEDO, J.P. Um Método Híbrido, Baseado em *Simulated Annealing* e Método da Subida, para Resolver o Problema de Seleção de Projetos Mineiros Concorrentes: IV Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e IV Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. Belo Horizonte, 2006.

ARAÚJO, F.C.R.; SOUZA, M.J.F. Planejamento Operacional de Lavra com Alocação Dinâmica de Caminhões: Abordagens Exata e Heurística. V Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e V Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. Belo Horizonte, 2008.

ARAÚJO, Francisco César Rodrigues; SOUZA, Marcone Jamilson Freitas. Uma abordagem Heurística para o Planejamento de Lavra com Alocação Dinâmica de Caminhões. Submetido para publicação na Revista Escola de Minas.