



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA DESPACHO
DE CAMINHÕES EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

BRUNO COSTA FERES

OURO PRETO – MG

Abril de 2021

BRUNO COSTA FERES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA DESPACHO
DE CAMINHÕES EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. ELTON DESTRO
(*DEMIN/EM/UFOP*)

OURO PRETO – MG

Abril de 2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F349d Feres, Bruno Costa.

Desenvolvimento de um sistema computacional para despacho de caminhões em uma mina a céu aberto. [manuscrito] / Bruno Costa Feres. - 2021.

53 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração a céu aberto. 2. Minas e mineração - Carregamento e transporte. 3. Otimização matemática. 4. Pesquisa operacional. I. Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68:519.8

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e dois dias do mês de abril de 2021, às 14h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Bruno Costa Feres** matrícula: 16.2.1416, intitulado: **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA DESPACHO DE CAMINHÕES EM UMA MINA A CÉU ABERTO**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Elton Destro, Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral e Eng.º de Minas Leandro Henrique Miranda Cambraia Moreira. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Eng.º de Minas Leandro Henrique Miranda Cambraia Moreira, segundo, o Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral e, em último, o Prof. Dr. Elton Destro. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 10,0 (dez vírgula zero), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 22 de abril de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Elton Destro

Membro: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

Membro: Eng.º de Minas Leandro Henrique Miranda Cambraia Moreira

Discente: Bruno Costa Feres

À minha família, com carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, coragem, e energia para a realização deste projeto e de todos os outros de minha vida.

À minha família, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem em meus planos, por estarem por trás de toda e qualquer conquista que venha a ter.

À República Katapulta, lar que me acolheu em Ouro Preto, onde fiz grandes irmãos para toda a minha vida.

A todos os amigos e amigas espalhados pelo mundo, por todo o companheirismo e conselhos, pelas horas de descontração e alegria que passamos juntos.

À UFOP, pelo ensino público de qualidade, à Escola de Minas, em especial ao Departamento de Engenharia de Minas, professores e funcionários.

Ao Prof. Dr. Elton Destro, guia e incentivador, pela orientação, pela dedicação e paciência, pela oportunidade de aprendizado e confiança depositada.

A Ouro Preto, por ser escola de vida acima de tudo, por ter estado em seu meio e vivido parte de sua história.

*“Não ganhe o mundo e perca sua alma;
sabedoria é melhor que prata e ouro”.*

(Bob Marley)

RESUMO

O caráter dinâmico e a complexidade das operações dentro de uma empresa mineradora tornam a tomada de decisão uma ação complicada. No sentido de facilitar essas decisões, atua a Pesquisa Operacional, cuja principal função é auxiliar a resolução de problemas complexos visando a otimização de processos. Tal otimização é alcançada através de soluções obtidas por métodos matemáticos, estatísticos e computacionais, que garantem maior assertividade e eficiência. Dessa forma, dentro do ambiente organizacional, consideráveis vantagens, econômicas e operacionais, podem ser atingidas pela aplicação de recursos da Pesquisa Operacional. Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema computacional para despachar caminhões, a serem carregados de minério ou estéril, para adequadas frentes de lavra em uma mina a céu aberto hipotética. O sistema despacha o caminhão sob o critério de se reduzir os desvios de produção das frentes em relação aos valores programados encaminhando-o àquela mais desviada. A ferramenta respeita um plano otimizado de lavra, isso garante que além da produção outros parâmetros importantes como qualidade e relação estéril-minério também sejam contemplados. Adicionalmente, esse trabalho tem por objetivo ser utilizado como ferramenta didático-pedagógica para alunos, no estudo da Pesquisa Operacional e Despacho de Caminhões. O aplicativo computacional possui potencial para ser utilizado em minas a céu aberto por seu desenvolvimento comprometido à parâmetros realistas, podendo, assim, causar impactos positivos e econômicos na operação de lavra.

Palavras-chave: Sistema de despacho de caminhões; Pesquisa operacional; Otimização; Lavra a céu aberto

ABSTRACT

The dynamic character and complexity of operations within a mining company render a decision making a complicated action. In order to facilitate these decisions, operational research works, whose main function is to assist in the resolution of complex problems aiming at the optimization of processes. Such optimization is achieved through solutions obtained by mathematical, statistical and computational methods, which guarantee greater assertiveness and efficiency. Thus, within the organizational environment, considerable advantages, both economic and operational, can be reached by the application of operational research resources. This work deals with the development of a computational system to dispatch trucks to be loaded with ore or waste, for adequate mining benches in a hypothetical open pit mine. The system dispatches the truck under the criterion of minimizing production deviations from the benches by simulating which one would present the greatest bias, if the trip is carried out, and forwarding it to the most deviated one. The tool respects an optimized mining plan, this ensures that in addition to production, other important parameters such as quality and stripping ratio are also taken into account. Additionally, this work aims to be used as a didactic-pedagogical tool, for students, in the study of operational research and truck dispatch. The solution has the potential to be used in open pit mines due to its development compromised to realistic parameters and can thus cause positive and economic impacts in the mining operation.

Keywords: Truck dispatching system; Operational research; Optimization; Open pit mining

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de uma região delimitada por um sistema linear de restrições, as quais definem o conjunto das soluções viáveis.	14
Figura 2 – Esquema de Alocação Estática de Caminhões.	18
Figura 3 – Esquema de Alocação Dinâmica de Caminhões.....	19
Figura 4 – Interface do Eclipse, ferramenta utilizada no desenvolvimento do projeto.	27
Figura 5 – Interface do JavaFX Scene Builder, onde foi criada a tela do aplicativo.....	28
Figura 6 – Menu Import Data, onde são lidos os dados de entrada no aplicativo.....	28
Figura 7 – Tabelas de dados da tela principal, onde são mostrados os dados de entrada.	29
Figura 8 – Campo onde a posição dos caminhões na mina é mostrada.	30
Figura 9 – Campo onde ocorre o despacho dos caminhões.	32
Figura 10 – Tabela que mostra o plano de lavra executado.....	33
Figura 11 – Quadro com o plano operacional de lavra otimizado, variável operacional e taxa de utilização, resultados do modelo de otimização.	34
Figura 12 – Tabelas preenchidas com os dados de entrada.....	36
Figura 13 – Distribuição da posição dos caminhões na mina, representando uma alocação inicial.	36
Figura 14 – Momento anterior a um despacho.	37
Figura 15 – Momento posterior a um despacho.	38
Figura 16 – Campo do despacho ao final de um turno.	38
Figura 17 – Plano de lavra executado ao final de um turno.	39
Figura 18 – About – informações básicas do projeto.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de controle químicos por frente de lavra.	22
Tabela 2 – Parâmetros de controle físicos por frente de lavra.	23
Tabela 3 – Limites de qualidade impostos pela planta de beneficiamento.	23
Tabela 4 – Tempos médios de ciclo dos caminhões.	24
Tabela 5 – Teores da mistura de minério encontrados pelo modelo de otimização.	35

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Objetivo Geral	13
2.2.	Objetivos Específicos	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Programação Linear.....	14
3.2.	Planejamento Operacional de Lavra	16
3.2.1.	Mistura de Minérios.....	16
3.2.2.	Alocação de Caminhões	17
3.3.	Sistema de Despacho.....	19
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1.	Mina Hipotética	22
4.2.	Plano Otimizado de Lavra.....	24
4.3.	Sistema Computacional	27
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1.	Plano Otimizado de Lavra.....	34
5.2.	Sistema Computacional	35
6.	CONCLUSÕES.....	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	APÊNDICE 1 – Modelo de otimização (Otimizador LINGO).....	43
	APÊNDICE 2 – Dados de entrada.....	49
	APÊNDICE 3 – Relatório de turno (Exemplo da simulação).....	50

1. INTRODUÇÃO

O universo da mineração demanda ações e decisões de alto grau de complexidade dos profissionais nele envolvidos, a todo momento. O ciclo minero-metalúrgico envolve um grande conjunto de processos, elementos e operações que fazem com que a tomada de decisão se torne uma tarefa difícil. Dessa forma, cabe às pessoas envolvidas nesse segmento buscarem soluções assertivas e eficientes almejando, assim, melhores resultados operacionais, econômicos, ambientais e sociais.

Uma ferramenta matemática que vem pra auxiliar no processo de tomada de decisão em situações realistas é a Pesquisa Operacional (BARBOSA & ZANARDINI, 2015). Através dela, que é comumente chamada de “PO”, a aplicação de métodos matemáticos permite a resolução de problemas reais pela decisão baseada em dados e correlações, alcançando-se soluções que melhor atendem objetivos de pessoas ou organizações como, por exemplo, lucro máximo ou custo mínimo. Permite a otimização de processos nas mais diversas áreas do conhecimento (LISBOA, 2002).

Ao se tratar da mineração, um dos maiores problemas é o da mistura de minérios, que consiste na definição de quanto minério de cada frente ou pilha será tomado para se gerar uma mistura final que atenda às especificações dos clientes. Cada frente possui características diferentes, como teores dos parâmetros de qualidade, granulometria e custo de operação, e disso decorre a necessidade de se bem definir um ritmo de lavra proporcional que gere um produto final adequado (COSTA, 2005). Segundo Gershon (1982), técnicas de Pesquisa Operacional solucionam esse problema com grande sucesso, principalmente com programação linear, que é a mais difundida nesse caso.

Definida a contribuição das frentes, ou seja, resolvido o problema da mistura de minérios, faz-se necessário estabelecer como o transporte dos materiais se dará para a usina de tratamento ou para a pilha de estéril. A isso se chama Planejamento Operacional de Lavra e nesse planejamento serão alocados os equipamentos de carga às frentes sendo, também, estabelecido o número de viagens que cada caminhão realizará para o destino (DESTRO, 2015). A alocação é chamada estática caso o caminhão sempre volte para a mesma frente após a sua descarga e, dinâmica, no caso do caminhão voltar para qualquer frente de lavra.

De posse do planejamento operacional de lavra, chega o momento de operacionalizá-lo. De acordo com Tu e Hucka (1985), para o caso da alocação dinâmica, como o caminhão não retorna para a mesma escavadeira todo o tempo, é necessário um sistema que indique o seu destino após a descarga e, a esse sistema, dá-se o nome de Sistema de Despacho. Tais sistemas podem ser: manuais, em que há a presença de um operador que, sem auxílio de um computador, toma todas as decisões de alocação; semiautomático, em que o computador auxilia o operador na alocação; e automático, em que não há operador, somente o computador toma decisões relacionadas à alocação.

Segundo Kolonja *et al.*, sistemas de despacho podem trazer diversas vantagens para um empreendimento minerário. Como um primeiro impacto operacional positivo está o potencial de melhoria nos tempos de fila e, pela melhor produtividade dos caminhões e dos equipamentos de carga, obtém-se uma vantagem econômica embutida, além do melhor monitoramento e definição da situação atual da mina. O sistema de despacho pode ser norteado pelos seguintes critérios: produtividade; qualidade; relação estéril-minério; e tempo de fila.

Neste trabalho, foi desenvolvido uma solução computacional que despacha caminhões segundo o critério produtividade, em que o sistema analisa os desvios das metas de produção por frentes e encaminha o caminhão para aquela que apresenta maior viés, sendo caracterizado como um sistema de despacho semiautomático. O sistema computacional foi chamado *goTruck*, e é voltado para a lavra de minas a céu aberto. Para a implementação, foi utilizada a linguagem de programação Java, e foi construído um modelo de mina hipotética em consonância com padrões realistas para que a aplicação possa se encaixar ao máximo nas situações operacionais de uma mina real de pequeno a médio porte, de minério de ferro, no quadrilátero ferrífero. Um plano otimizado de lavra gerado através do otimizador LINGO, da LINDO System, assim como o teor das frentes, os limites dos parâmetros de qualidade e granulometria estabelecidos pela usina e a capacidade dos caminhões, são os dados de entrada do sistema de despacho. Esse, por sua vez, além de despachar o caminhão, calcula o teor da mistura, mostra o plano executado de lavra, permite a visualização de um panorama geral do momento atual da mina e gera um relatório de turno com as informações mais relevantes a serem consideradas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um aplicativo computacional para despacho de caminhões em minas a céu aberto.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Desenvolver um sistema computacional, caracterizado como um sistema de despacho semiautomático, que despache caminhões para as frentes de lavra para serem carregados sob o critério de se reduzir os desvios em relação às metas de produção programadas para essas frentes;
- b) Utilizar um plano operacional de lavra otimizado como dado de entrada para o aplicativo desenvolvido, e que será reproduzido pelo sistema de despacho para, assim, garantir o alcance das metas de produção, qualidade e relação estéril-minério, bem como reduzir o número de caminhões em operação;
- c) Utilizar o sistema computacional desenvolvido como uma ferramenta didático-pedagógica para alunos de Engenharia de Minas no estudo de Pesquisa Operacional e de Sistemas Computacionais para Despacho de Caminhões;
- d) Mostrar a importância da aproximação dos profissionais da mineração, especificamente os Engenheiros de Minas, com as técnicas de programação de computadores, pois, através delas, é possível a implementação de soluções viáveis, econômicas e inovadoras nas atividades da mineração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Programação Linear

De acordo com Costa (2005), a programação linear se fundamenta na maximização ou minimização de uma função linear, chamada função objetivo, que é delimitada por um sistema linear de restrições. Tais restrições representam limitações impostas pelo problema, que devem ser respeitadas. Essa delimitação define um espaço chamado de conjunto das soluções viáveis (Figura 1) e, dentre essas, a melhor solução é chamada de ótima. Ainda segundo este autor, o problema de programação linear deve ser equacionado e reduzido à uma forma padrão para a aplicação de algoritmos que permitam chegar à solução ótima, sendo o mais comum o Método SIMPLEX.

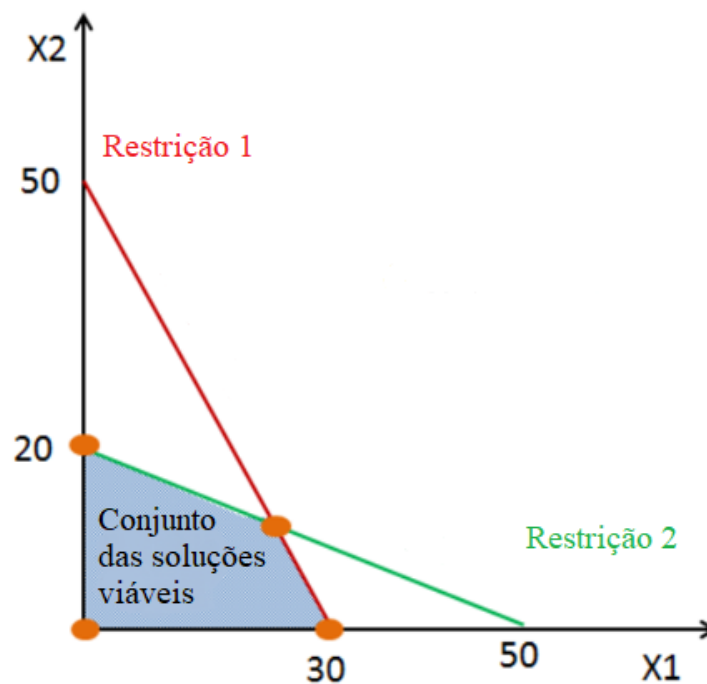


Figura 1 – Exemplo de uma região delimitada por um sistema linear de restrições, as quais definem o conjunto das soluções viáveis. **Fonte:** Modificado de Navlani, 2021.

O modelo a ser resolvido pelo Método SIMPLEX pode ser encontrada em Bregalda *et al.* (1988), sendo representado pelas relações (3.1.1) a (3.1.4).

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j = Q(x) \quad (3.1.1)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.1.2)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.1.3)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3.1.4)$$

Em que $j = 1, \dots, n$ são as atividades a serem realizadas, c_j é o custo da j -ésima atividade, x_j é um quantificador do nível de operação da j -ésima atividade, $i = 1, \dots, m$ são as restrições do problema, b_i é a quantidade de recursos disponíveis ou exigências a serem respeitadas, a_{ij} é a quantidade de recurso i em uma unidade da atividade j e $Q(x)$ é o valor mínimo, nesse caso da minimização. A equação (3.1.1) é a função objetivo, e as equações (3.1.2), (3.1.3) e (3.1.4) são as restrições do problema, sendo que a equação (3.1.4) é a condição de não negatividade das variáveis de decisão.

Existem métodos que muito se aproximam da programação linear mas que apresentam diferenciais. Problemas de programação inteira e mista, por exemplo, são formulados da mesma forma que os de programação linear, mas possuem ao menos uma restrição de integralidade que exige que as variáveis assumam valores inteiros. Quando todas as variáveis são inteiras, o problema é chamado de programação inteira, se houver variáveis não inteiras dentre as variáveis inteiras, o problema é de programação mista (LOESCH & HEIN, 1999).

Já a programação por metas, *Goal Programming*, segundo Bueno e Oliveira (2004), é uma técnica de pesquisa operacional que busca soluções para problemas de múltiplas metas, realidade de muitas empresas, onde se faz necessária a satisfação de um objetivo ou o alcance da máxima aproximação a ele. Nesta programação, são introduzidos, na função objetivo, desvios em relação às metas e essas possuem pesos, ou seja, importâncias diferentes na otimização. Tal inserção torna o problema menos rígido e amplia o espaço de soluções viáveis e, assim, permite que, caso a meta não seja alcançada, a solução ótima será tão próxima quanto possível dela.

Costa (2002) descreve a formulação genérica deste método como representado pelas relações (3.1.5) a (3.1.10).

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{i=1}^m (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) = Q(x) \quad (3.1.5)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - d_i^+ + d_i^- = b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.1.6)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.1.7)$$

$$x_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3.1.8)$$

$$d_i^+ \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.1.9)$$

$$d_i^- \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.1.10)$$

Sendo $j = 1, \dots, n$ as atividades a se realizar, c_j é o custo da j -ésima atividade, $i = 1, \dots, m$ são as restrições, b_i é a quantidade de recursos disponíveis ou exigências a serem respeitadas e a_{ij} é a quantidade de recurso i em uma unidade da atividade j . Até aqui, exatamente igual à formulação do problema de programação linear, as três que seguem são variáveis de decisão. O termo x_j é um quantificador do nível de operação da j -ésima atividade, d_i^+ é o desvio positivo da exigência i , e d_i^- o desvio negativo. Desvio positivo quantifica quanto da meta b_i foi superada, desvio negativo quantifica quanto falta para se atingir a meta b_i . w_i^+ e w_i^- , respectivamente, representam os pesos dos desvios positivo e negativo em relação à meta. Os desvios dão margem para que a restrição (3.1.2) seja desviada em relação à meta. A equação (3.1.5) é a função multiobjetivo que agrega os desvios, que devem ser minimizados, e os pesos. As equações (3.1.6) a (3.1.10) são as restrições do problema, sendo as últimas três equações, condições de não negatividade das variáveis de decisão. As relações (3.1.9) e (3.1.10) foram adaptadas do autor.

3.2. Planejamento Operacional de Lavra

3.2.1. Mistura de Minérios

Diferentes frentes de minério compoem uma mina, seja ela a céu aberto ou subterrânea. As características químicas, como o teor dos parâmetros da qualidade, as características físicas, como faixas granulométricas, e as características econômicas, como o custo de operação de lavra, flutuam consideravelmente conforme a variabilidade do depósito. Como o cliente compra um minério sob determinada especificação e dificilmente o material de apenas uma frente será

adequado para a venda, faz-se necessária uma mistura dos materiais das frentes disponíveis para se atingir o produto final desejado pelo consumidor. Quanto de material de cada frente será misturado é o chamado problema da mistura de minérios e sua solução define o ritmo de lavra de cada frente, para que, minimizando-se o custo se atinja a qualidade requerida (COSTA, 2005).

Segundo Gershon (1982), as técnicas de pesquisa operacional resolvem, com sucesso, o problema da mistura de minérios. O método mais comum e de melhores resultados é o da programação linear. Chanda e Dagdelen (1995) e Pinto *et al.* (2003), em seus trabalhos, apresentam modelos de programação linear que solucionam o problema sob diferentes óticas.

3.2.2. Alocação de Caminhões

Uma vez definidos os volumes a serem lavrados em cada frente de lavra, surge a demanda de se definir uma estratégia quanto ao transporte dos materiais aos seus destinos: pilha de estéril ou usina de beneficiamento. Cada mina possui uma frota de equipamentos de transporte e carga, na maioria das vezes, de capacidades diferentes, sendo o ritmo de lavra definido conforme a capacidade de operação dessa frota. Na lavra de mina a céu aberto existem dois critérios de alocação de caminhões: estático e dinâmico (ARAÚJO, 2008)

Alocação Estática de Caminhões

A alocação estática de caminhões confere simplicidade à operação e sua implementação ainda se faz presente devido à economia alcançada por não necessitar de um sistema de despacho de caminhões. Na alocação estática, há apenas uma rota para um caminhão, definida pelos pontos de carga e de descarga, o deslocamento é entre esses dois pontos fixos. Ou seja, o caminhão sempre volta para o ponto de onde partiu, não podendo ir para outra frente de lavra senão a que lhe foi definida inicialmente (Figura 2). Sendo assim, o ritmo de lavra é função da capacidade e da produtividade dos caminhões e dos equipamentos de carga (ARAÚJO, 2008). Segundo Kolonja *et al.* (1993), historicamente, minas a céu aberto operam sob esse regime, mas, com o advento de melhores sistemas de despacho, a alocação dinâmica vêm tomando espaço, melhorando o atendimento da produção e da qualidade no curto prazo.



Figura 2 – Esquema de Alocação Estática de Caminhões. **Fonte:** Araújo, 2008.

Alocação Dinâmica de Caminhões

Ao contrário do que acontece na alocação estática, os caminhões não são alocados em um mesmo equipamento de carga durante toda a operação. Após cada descarga, o caminhão é encaminhado para uma carregadeira conforme a realidade momentânea da mina, como explicam Tu e Hucka (1985). Ou seja, o equipamento de transporte pode ser despachado para diferentes frentes de lavra, desde que haja compatibilidade entre os equipamentos de carga e os de transporte (Figura 3). Esse regime pode acarretar em um aumento na produtividade do empreendimento ou na redução da frota mantendo-se um mesmo nível de produção (COSTA, 2005).

Segundo Araújo (2008), uma vantagem que se alcança com esse sistema é a de ser possível a redução do tempo de fila, dado que o caminhão pode ser alocado em diferentes pontos de carga (caso haja fila em um ponto, ele pode ser despachado para outra frente). Se tratando de desvantagens da alocação dinâmica, com ela se exige mais operações e demanda um sistema de despacho.

Para Pinto (2007), como a alocação dinâmica requer um sistema de despacho de caminhões, os termos “alocação dinâmica” e “despacho” podem ser tomados como equivalentes. Assim, ao se dizer despacho, faz-se referência à alocação dinâmica de caminhões aos equipamentos de carga em frentes de lavra.



Figura 3 – Esquema de Alocação Dinâmica de Caminhões. **Fonte:** Araújo, 2008.

3.3. Sistema de Despacho

De acordo com Soumis *et al.* (1989), ao sistema de despacho é conferida a decisão de para onde o caminhão vazio irá. Tanto em minas a céu aberto quanto em minas subterrâneas, a lógica de um despacho é a mesma, porém, em minas subterrâneas, a dinâmica de formação e eliminação de rotas é mais recorrente, além de que as rotas subterrâneas tendem a ser mais danificadas e, por consequência, mais tempo se passa em recuperação, o que gera atrasos nas viagens dos caminhões. Além disso, percebe-se uma tendência maior de automatização em minas subterrâneas devido ao maior risco associado à modalidade (SAAYMAN, 2006).

Um sistema de despacho funciona sob critérios estabelecidos que podem ser atendimento aos parâmetros de controle de qualidade da planta de beneficiamento, produtividade, relação estéril-minério entre outros. Em minas nas quais a alocação dinâmica é implementada, um sistema de despacho é uma realidade necessária (PINTO, 2007). Segundo Chironis (1985), o primeiro relato de um sistema de despacho em funcionamento ocorreu em 1979, em Tyrone, em uma mina de cobre.

O transporte de materiais em minas a céu aberto envolve grande quantidade de capital devido aos grandes volumes (MARAN & TOPUZ, 1988). Assim, o transporte deve ocorrer de forma a se minimizar os custos, pois esse custo define a escolha das frentes de lavra e o ritmo dela. Dessa forma, um sistema de despacho pode otimizar a operação no sentido de reduzir a

frota para uma mesma produtividade ou elevá-la com o mesmo número de caminhões (COSTA, 2005). Kolonja *et al.* (1993) afirma que, operacionalmente, um sistema de despacho têm o potencial de reduzir filas e aumentar a produtividade, mas, além disso, melhor monitoramento e maior controle dos parâmetros da qualidade ocorrem.

O sistema de despacho confere maior fluidez à operação, permitindo, por exemplo, que a mistura final seja priorizada ao despachar um caminhão para uma frente de melhor qualidade, ou ainda, tem o potencial de evitar filas excessivas em carregadeiras enquanto outras estejam livres (TU & HUCKA, 1985). Mas, uma questão importante levantada por Gershon (1982), é que se deve levar em conta todos os fatores, conjuntamente, ao se otimizar um processo, nesse caso, o despacho. Pois, caso se resolvam os problemas separadamente, produtividade, questão de filas, qualidade de minério, ao final, pode-se chegar em soluções conflituosas. Para melhores resultados, os problemas devem ser considerados simultaneamente.

Segundo Tu e Hucka (1985), existem três tipos de sistemas de despachos de caminhões:

i. Sistemas de despacho manual: esse sistema começou a ser utilizado na década de 60. Nele, um trabalhador, chamado de despachador, fica posicionado em uma posição estratégica da mina, de preferência um local elevado para se ter uma visão ampla da operação. Esse profissional, através de rádios-comunicadores envia a decisão de alocação aos operadores dos equipamentos de carga e transporte em operação. Uma vez que o despachador precisa ter contato visual com as máquinas, esse sistema não é indicado para minas de maior porte, sendo indicado para minas de pequeno a médio porte. Além disso, muitos equipamentos em operação podem fazer com que o responsável pelo despacho não tenha tempo hábil para a tomada de decisão correta. Esse sistema é totalmente manual, ou seja, todo o processo é de responsabilidade de um ser humano;

ii. Sistemas de despacho semiautomáticos: nesse sistema, um computador recebe e armazena as condições de operação dos equipamentos de carregamento e transporte e suas localizações. Esse computador oferece ao despachador informações que o auxiliam na decisão de alocação. Acontece que o computador não possui contato direto com as máquinas, sendo o operador do sistema que, de posse das informações da situação atual da mina e conforme a sugestão do sistema computacional, entra em contato com os operadores das escavadeiras e dos caminhões e lhes comunica os indicativos. É comum a comunicação via rádio-transmissor.

Nesse sistema há interação máquina (computador) e homem na tomada de decisão.

iii. Sistemas de despacho automáticos: nesse sistema, há um contato direto entre o computador e os equipamentos de carregamento e transporte. O sistema computacional recebe informações como posição dos equipamentos e suas condições de operação, assim como dados da situação da mina, e converte esse conjunto de informações em uma tomada de decisão. O próprio computador dispara comandos para as máquinas. Logo, nesse sistema, não há a necessidade da interferência humana no processo.

Conforme Çetin (2004), o elevado custo de um sistema de despacho, muitas vezes, atua como impeditivo à sua implementação em minas de menor porte, que, economicamente falando, não se justifica. Todavia, os avanços tecnológicos vêm, cada vez mais, abrindo portas para a introdução desses sistemas no mercado, reduzindo seus custos de implementação. Dessa forma, os benefícios associados a tais sistemas, dentre eles o menor número de caminhões em atividade ao mesmo tempo e a maximização da produtividade e dos tempos de operação, tornam-se cada vez mais recorrentes (CHIRONIS, 1985). Percebe-se, assim, que existem diversos benefícios alcançados por um sistema de despacho, todavia, Tu e Hucka (1985) ressaltam a importância de um estudo minucioso quanto às melhorias que serão obtidas em oposição ao investimento envolvido, sendo necessário analisar se a melhoria se paga. Como cada mina tem sua peculiaridade, o sistema deve se encaixar perfeitamente, daí a importância de tal análise. Mas, ainda assim, Chironis (1985) afirma que, caso uma mina esteja alocando caminhões dinamicamente, o sistema facilmente se paga.

Os custos envolvidos no transporte em minas a céu aberto, ou seja, a troca periódica de maquinário, os custos de energia ou de combustíveis, o reparo de vias, o aprofundamento de cavas, dentre outros, tornam essas operações as mais onerosas para um empreendimento minerário. Com a implementação de sistemas computadorizados de despacho, observa-se uma melhoria de 3% até 15% na produtividade dos caminhões na operação de mina (TU & HUCKA, 1985). O sistema de despacho atua conforme uma política de despacho, ou critério. Para Kolonja *et al.* (1993), tal política junto de outras variáveis é o que determina a eficiência da frota de caminhões e carregadeiras. A alocação de um equipamento de transporte deve levar em consideração os destinos de todos os caminhões e, uma decisão voltada para apenas um caso, torna o sistema seletivo e causa perda de otimização (SOUMIS *et al.* 1989).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Mina Hipotética

Para o desenvolvimento do sistema computacional, alvo deste trabalho, foi considerada uma mina hipotética sobre a qual um plano otimizado de lavra foi elaborado. A mina foi definida considerando parâmetros reais de uma mina de ferro a céu aberto do Quadrilátero Ferrífero, para que os resultados sejam o mais realísticos possíveis. A mina possui cinco frentes de minério e duas frentes de estéril. Possui uma frota de doze caminhões, sendo sete deles de 60 toneladas e cinco de 90 toneladas. Das três carregadeiras disponíveis, as produtividades máxima e mínima em toneladas por hora, respectivamente são: da primeira, 1000 e 700; da segunda, 700 e 500; e da terceira, 850 e 600. A mina opera no regime de 365 dias por ano, 24h por dia, e a taxa horária de produção é de 1400 toneladas, fornecendo uma produção anual de, aproximadamente, 12.000.000 de toneladas. A densidade média do minério de ferro da mina é de 3,7 t/m³ e a relação estéril-minério é projetada para o intervalo entre 0,45 e 0,53. A disponibilidade física igual a 1,0 e a taxa de utilização de 0,9 foram utilizadas para se determinar a produtividade máxima dos equipamentos de carga. O funcionamento da mina ocorre em turnos de seis horas. Os parâmetros de controle das frentes, os limites impostos pela usina de tratamento e os tempos de ciclo são mostrados nas tabelas 1 a 4.

Tabela 1 – Parâmetros de controle químicos por frente de lavra.

Frentes	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	P(%)	PPC (%)
Minério 1	58,00	14,52	1,02	0,36	0,051	1,52
Minério 2	45,93	23,42	5,25	0,16	0,030	4,22
Minério 3	57,50	8,20	2,57	0,34	0,098	6,91
Minério 4	51,05	18,95	1,16	0,68	0,080	4,76
Minério 5	60,10	7,90	3,89	0,12	0,094	3,28
Estéril 1	29,73	44,74	4,97	0,61	0,074	5,71
Estéril 2	39,64	37,46	2,31	0,29	0,069	2,68

Por compromisso com a realidade, foi realizado o fechamento químico dos parâmetros acima.

Tabela 2 – Parâmetros de controle físicos por frente de lavra.

Frentes	+6,30mm (%)	-6,30mm +0,15mm (%)	-0,15mm (%)
Minério 1	23,10	50,80	23,90
Minério 2	30,90	44,70	21,90
Minério 3	22,25	48,20	24,80
Minério 4	31,40	46,30	18,40
Minério 5	22,40	60,50	15,00
Estéril 1	26,70	59,90	12,60
Estéril 2	28,60	45,80	25,60

As faixas foram pensadas de forma a coincidirem com os três produtos mais comuns no mercado de minério de ferro: *granulado (lump)*, *sinter feed*, e *pellet feed*.

Tabela 3 – Limites de qualidade impostos pela planta de beneficiamento.

Limites	Fe (%)	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Mn (%)	P (%)	PPC (%)	+6,30 mm +0,15 mm (%)	-6,30 mm -0,15 mm (%)
Superior	60,00	8,00	2,90	0,35	0,100	3,60	26,00	54,00
Inferior	56,00	4,00	1,30	0,05	0,060	3,40	20,00	50,00

Tabela 4 – Tempos médios de ciclo dos caminhões.

		Caminhões	
		60 t	90 t
Frentes	Minério 1	21,00 min	22,20 min
	Minério 2	17,75 min	18,00 min
	Minério 3	19,10 min	19,75 min
	Minério 4	23,15 min	23,75 min
	Minério 5	16,10 min	17,10 min
	Estéril 1	21,45 min	21,80 min
	Estéril 2	18,20 min	18,50 min

4.2. Plano Otimizado de Lavra

Foi utilizado um modelo de programação linear por metas misto com os dados da mina hipotética, a fim de se obter o plano otimizado de lavra. Foi utilizado o otimizador LINGO, da LINDO System, e a alocação de caminhões é dinâmica. O modelo de otimização, na forma literal abaixo, foi adaptado de Costa (2005) e o código na linguagem LINGO é apresentado no Apêndice 1.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^P (wtn_i * dtn_i + wtp_i * dtp_i) + \sum_{j=1}^N (Pop * op_j) + wpn * dpn + wpp * dpp \quad (4.2.1)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^F (x_i) - nH \times pl + dpn \geq 0 \quad (4.2.2)$$

$$\sum_{i=1}^F (x_i) - nH \times pu - dpp \leq 0 \quad (4.2.3)$$

$$\sum_{i=1}^M ((t_{ij} - tl_j) \times x_i) + dtn_j \geq 0 \quad \forall j \in P \quad (4.2.4)$$

$$\sum_{i=1}^M ((t_{ij} - tu_j) \times x_i) + dtp_j \leq 0 \quad \forall j \in P \quad (4.2.5)$$

$$\sum_{i=1}^E (x_i) - remMin \times \sum_{j=1}^M (x_i) \geq 0 \quad (4.2.6)$$

$$\sum_{i=1}^E (x_i) - remMax \times \sum_{j=1}^M (x_i) \leq 0 \quad (4.2.7)$$

$$\sum_{i=1}^K (y_{ij}) \leq 1 \quad \forall j \in F \quad (4.2.8)$$

$$\sum_{i=1}^F (y_{ij}) \leq 1 \quad \forall j \in K \quad (4.2.9)$$

$$x_j \geq \sum_{i=1}^K (nH \times Cmin_i \times y_{ij}) \quad \forall j \in F \quad (4.2.10)$$

$$x_j \leq \sum_{i=1}^K (nH \times Cmax_i \times y_{ij}) \quad \forall j \in F \quad (4.2.11)$$

$$x_j = \sum_{i=1}^N (n_{ij} \times CapCam_i) \quad \forall j \in F \quad (4.2.12)$$

$$\sum_{i=1}^F (n_{ij} \times tCiclo_{ij}) \geq nH \times 60 \times TxUtzMin \times op_j \quad \forall j \in N \quad (4.2.13)$$

$$\sum_{i=1}^F (n_{ij} \times tCiclo_{ij}) \leq nH \times 60 \times TxUtzMax \times op_j \quad \forall j \in N \quad (4.2.14)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^F (n_{ij} \times tCiclo_{ij})}{nH \times 60} \leq op_j \quad \forall j \in N \quad (4.2.15)$$

$$y_{ij}, op_l \in \{0,1\} \quad \forall i \in F; \forall j \in K; \forall l \in N \quad (4.2.16)$$

$$n_{ij} \in Z^+ \quad \forall i \in F; \forall j \in N \quad (4.2.17)$$

Dados de entrada:

- F conjunto das frentes de lavra;
- M conjunto das frentes de minério;
- E conjunto das frentes de estéril;
- P conjunto dos parâmetros de qualidade do minério;
- K conjunto dos equipamentos de carga;
- N conjunto dos equipamentos de transporte;
- nH número de horas do turno;
- pl ritmo de lavra mínimo (t/h);
- pu ritmo de lavra máximo (t/h);
- wtn penalidade por desvio negativo nos parâmetros de qualidade do minério;
- wtp penalidade por desvio positivo nos parâmetros de qualidade do minério;
- Pop penalidade por quantidade de equipamentos de transporte em operação;
- op variável binária que indica se o caminhão está ou não em operação;
- wpn penalidade por desvio negativo na produção;
- wpp penalidade por desvio positivo na produção;
- $remMin$ relação estéril-minério mínima;
- $remMax$ relação estéril-minério máxima;
- t teores dos parâmetros de qualidade do minério (%);
- tl teores mínimos dos parâmetros de qualidade do minério (%);
- tu teores máximos dos parâmetros de qualidade do minério (%);
- $Cmin$ capacidade mínima dos equipamentos de carga (t/h);
- $Cmax$ capacidade máxima dos equipamentos de carga (t/h);
- $CapCam$ capacidade dos equipamentos de transporte (t);

$tCiclo$	tempos de ciclo dos equipamentos de transporte às frentes de lavra;
$TxUtzMin$	taxa de utilização mínima dos equipamentos de transporte;
$TxUtzMax$	taxa de utilização máxima dos equipamentos de transporte.

Variáveis de decisão:

x	ritmo de lavra das frentes de minério (t/h);
y	variável binária que indica a posição do equipamento de carga;
n	número de viagens dos equipamentos de transporte às frentes de lavra;
d_{pn}	desvio positivo na produção;
d_{pp}	desvio negativo na produção;
d_{tn}	desvio positivo nos parâmetros de qualidade do minério;
d_{tp}	desvio negativo nos parâmetros de qualidade do minério.

A relação (4.2.1) representa a função objetivo, com ela se busca minimizar os desvios relativos à qualidade e à produção, além de reduzir a frota em operação. As restrições (4.2.2) e (4.2.3) delimitam a produção pelos valores de produção mínimo e máximo, respectivamente. Analogamente, as restrições (4.2.4) e (4.2.5), restringem os teores dos parâmetros de qualidade a um intervalo definido pelos limites mínimo e máximo. A cada uma dessas restrições é atribuído um desvio. Dessa forma, caso o objetivo não seja alcançável, o resultado será tão próximo a ele quanto possível for. A relação estéril-minério é delimitada pelas relações estéril-minério mínima e máxima, respectivamente, nas restrições (4.2.6) e (4.2.7). A relação (4.2.8) restringe a, no máximo, um equipamento de carga a ser alocado em uma frente de lavra, e a restrição (4.2.9) define que cada equipamento de carga só pode operar em uma única frente de lavra. A restrição (4.2.10) limita a produção a ser menor que a capacidade horária máxima das carregadeiras vezes o número de horas do turno, assim como a restrição (4.2.11) limita a produção a ser maior que a capacidade horária mínima das carregadeiras vezes o número de horas do turno. O ritmo de lavra deve ser igual à capacidade dos caminhões vezes suas respectivas viagens, o que é definido na restrição (4.2.12). As taxas de utilização mínima e máxima são consideradas nas relações (4.2.13) e (4.2.14), respectivamente. A restrição (4.2.15) é a que determina o valor da variável operacional, ou seja, se os caminhões estão ou não em operação, buscando a menor frota operacional possível. A relação (4.2.16) define a variável operacional e a variável de alocação das carregadeiras como binárias. A restrição (4.2.17) define a variável quantidade de viagens por caminhão como inteira.

4.3. Sistema Computacional

A ferramenta utilizada no desenvolvimento do projeto foi o Eclipse (Figura 4), um IDE (*Integrated Development Environment*) para desenvolvimento de aplicações. A linguagem de programação utilizada foi o JAVA. A criação da tela do aplicativo foi feita através do JavaFX *Scene Builder* (Figura 5), ferramenta de criação rápida de interfaces, que possui uma série de componentes práticos utilizáveis.

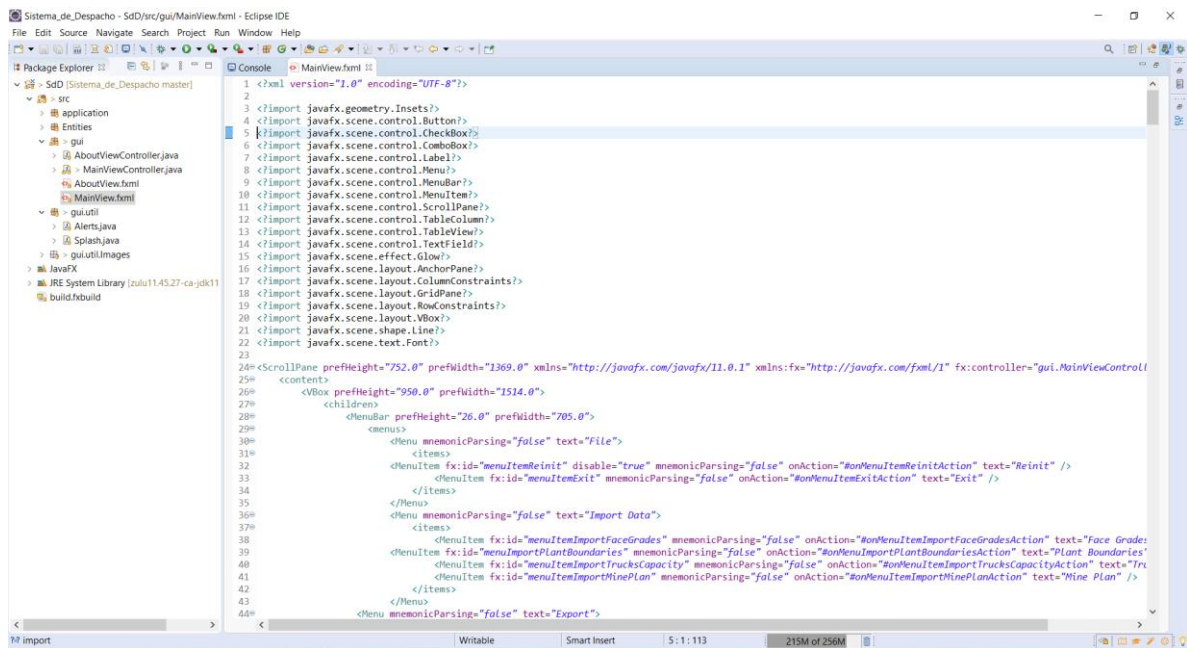


Figura 4 – Interface do Eclipse, ferramenta utilizada no desenvolvimento do projeto.

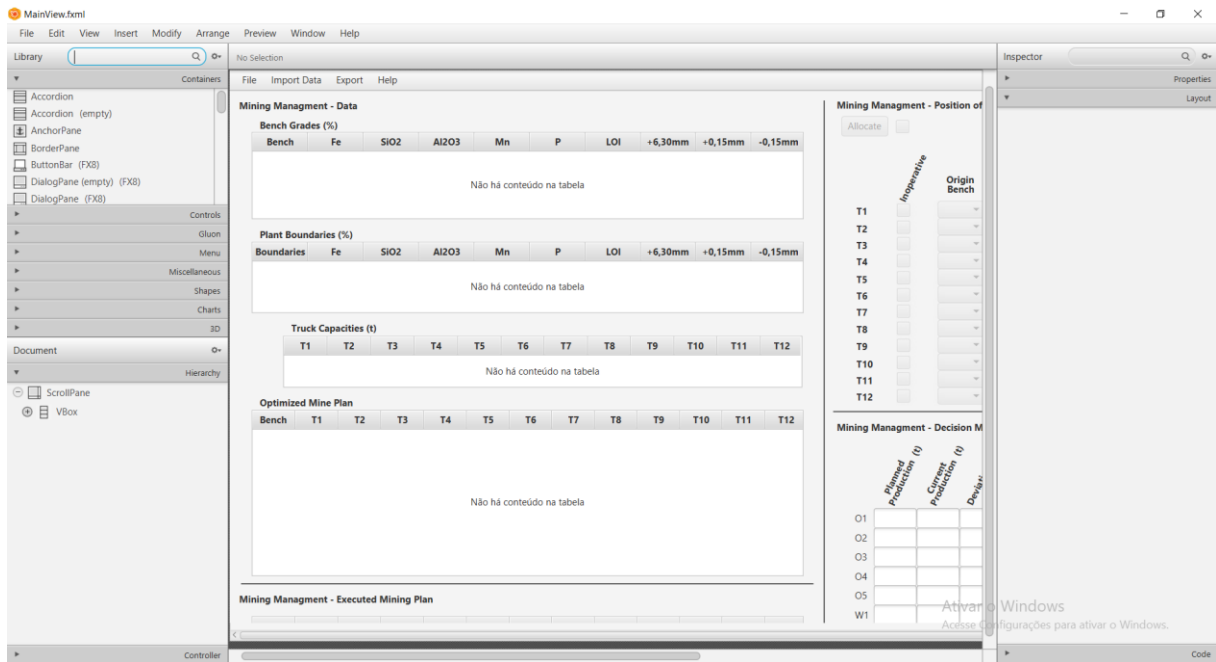


Figura 5 – Interface do JavaFX *Scene Builder*, onde foi criada a tela do aplicativo.

Foi desenvolvido neste trabalho o sistema de despacho de caminhões chamado de *goTruck*, cujo funcionamento segue o seguinte padrão: i) Leitura de dados; ii) Alocação inicial de caminhões; iii) Despacho de caminhões; iv) Finalização e geração de relatório de turno.

i) Leitura de dados

A leitura dos dados se dá no menu “*Import Data*” (Figura 6). Nesse menu pode-se importar dados de arquivos .txt (.csv) referentes ao teor das frentes (“*Bench Grades*”), limites da planta (“*Plant Boundaries*”), capacidade dos caminhões (“*Truck Capacities*”), e plano de lavra (“*Mine Plan*”). Exemplos dos arquivos de entrada estão no Apêndice 2.

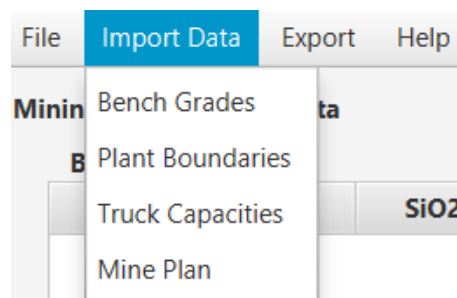


Figura 6 – Menu *Import Data*, onde são lidos os dados de entrada no aplicativo.

À medida que os dados vão sendo importados, as tabelas de dados da tela principal vão sendo preenchidas (figura 7): “*Bench Grades (%)*” (Teor das frentes (%)), “*Plant Boundaries (%)*” (Limites da planta (%)), “*Truck Capacities*” (Capacidades dos caminhões (t)), e “*Optimized Mine Plan*” (Plano de lavra otimizado).

Mining Managment - Data

Bench Grades (%)

Bench	Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P	LOI	+6,30mm	+0,15mm	-0,15mm
Não há conteúdo na tabela									

Plant Boundaries (%)

Boundaries	Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P	LOI	+6,30mm	+0,15mm	-0,15mm
Não há conteúdo na tabela									

Truck Capacities (t)

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Não há conteúdo na tabela											

Optimized Mine Plan

Bench	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Não há conteúdo na tabela												

Figura 7 – Tabelas de dados da tela principal, onde são mostrados os dados de entrada.

ii) Alocação inicial de caminhões

Lidos os dados, no canto superior direito da tela principal são liberadas caixas de seleção para que ocorra uma alocação inicial. A ideia é que, no início do turno, o despachador obtenha informações da situação da mina (por rádio) e passe-as para esse campo (figura 8).

Mining Managment - Position of trucks in the mine

Allocate ☐

	Inoperative	Origin Bench	Loading Queue	Loading	Full Haulage	Crusher Queue	Crusher Discharge	Waste Rock Dump Queue	Waste Rock Dump Discharge	Empty Haulage	Supply Queue	Supply
T1	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T2	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T3	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T4	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T5	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T6	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T7	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T8	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T9	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T10	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T11	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T12	☐		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Figura 8 – Campo onde a posição dos caminhões na mina é mostrada.

Nesta etapa, ocorre uma alocação conforme o primeiro instante do turno na mina, mas, no decorrer da operação, esse campo atua como panorama de como está a situação da mina. As caixas de seleção “*Inoperatives*” (Inoperantes) são controladas pelo sistema. A caixa de listagem “*Origin Bench*” (Frente de origem) de cada caminhão apresenta apenas as frentes de lavra para as quais aquele caminhão possui viagens programadas. As demais caixas de seleção, das quais apenas uma pode estar selecionada, por caminhão, mostram a posição atual dele, são: “*Loading Queue*” (Fila do carregamento), “*Loading*” (Carregamento), “*Full Haulage*” (Transporte cheio), “*Crusher Queue*” (Fila do britador), “*Crusher Discharge*” (Descarga no britador), “*Waste Rock Dump Queue*” (Fila na pilha de estéril), “*Waste Rock Dump Discharge*” (Descarga na pilha de estéril), “*Empty Haulage*” (Transporte vazio), “*Supply Queue*” (Fila de abastecimento) e “*Supply*” (Abastecimento). Após todos caminhões operantes alocados, clica-se no botão “*Allocate*” (Alocar); apenas com todos os caminhões operantes alocados é possível prosseguir para a etapa de despacho.

iii) Despacho de caminhões

Iniciado o turno e feita a alocação inicial, dá-se início ao despacho de caminhões (figura 9). Em “*Planned Production (t)*” (Produção planejada (t)), serão mostradas as produções programadas para as frentes de lavra. Em “*Current Production (t)*” (Produção atual (t)), será mostrada a produção no momento, atualizada a cada despacho. Em “*Deviation (%)*” (Desvio

(%)), será mostrado quanto a produção está desviada da produção programada. O desvio é calculado conforme a equação (4.3.1). O sistema de despacho funciona sob a política da produtividade, sendo os desvios em relação às metas de produção analisados na decisão da alocação. A frente que apresenta maior desvio é a frente para a qual o caminhão será encaminhado. Uma condição de contorno foi implementada para situações de final de turno: quando ocorrer de um caminhão completar suas viagens programadas antes do término do turno, ele será despachado para a frente que estiver mais desviada em relação às metas de produção no momento da sua alocação, para evitar que ele seja retirado de operação. É uma condição que pode acarretar em um resultado ligeiramente diferente do obtido no modelo de otimização, mas sob o ponto de vista prático, os resultados poderão, ainda assim, ser considerados satisfatórios.

$$D_{ij} = \left(1 - \frac{PC_j}{PP_j}\right) \times 100 \quad (4.3.1)$$

Em que:

D_{ij} é o desvio corrente da produção prevista na frente j na alocação do caminhão i (em %);

PC_j é a produção corrente na frente j (em t);

PP_j é a produção programada na frente j (em t);

j é uma frente para a qual o caminhão i ainda tem viagens programadas para fazer no momento corrente.

A caixa ao lado do desvio é um indicador se a meta de produção foi alcançada pela frente: enquanto ainda não tiver atingido, ela estará vermelha e, quando atingir, estará verde. Em “*Date*” (Data) a data é apresentada e, em “*Time*” (Hora), o horário é mostrado. Em “*Ore*” (Minério) é mostrada a produção total de minério, em “*Waste*” (Estéril) é mostrada a movimentação total de estéril, em “*Stripping Ratio*” (Relação estéril-minério) é mostrada a relação estéril-minério, calculada conforme equação (4.3.2).

$$REM = \frac{PE}{PM} \quad (4.3.2)$$

Sendo:

REM é a relação estéril-minério;

PE é a movimentação total de estéril em toneladas;

PM é a produção total de minério em toneladas.

Em “*Total*” (Total), é mostrada a soma da movimentação de estéril com a produção de minério. Em “*Current Grade*”, é mostrado o teor da mistura, atualizado a cada despacho. Abaixo de cada parâmetro há uma caixa que indica se o teor está dentro dos limites de teores especificados pela usina de tratamento (quando na cor vermelha, o teor está fora; se verde, está dentro). O despacho acontece selecionando um caminhão na caixa de seleção abaixo de “*Select the truck for dispatch:*” (Selecione o caminhão para despacho) e clicando em “*Dispatch*” (Despacho). Com isso, aparecerá na caixa de texto abaixo da caixa de seleção a frente para a qual o caminhão foi despachado e os campos serão atualizados.

Mining Management - Decision Making

	Planned Production (t)	Current Production (t)	Deviation (%)	
O1				☐
O2				☐
O3				☐
O4				☐
O5				☐
W1				☐
W2				☐

Date

Time

Select the truck for dispatch:

Dispatch

Productions (t):

Ore

Waste

Stripping Ratio

Total

Current Grade

Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P	LOI	+6,30mm	+0,15mm	-0,15mm
Não há conteúdo na tabela								
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Finish

Figura 9 – Campo onde ocorre o despacho dos caminhões.

Mining Managment - Executed Mining Plan												
Bench	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Não há conteúdo na tabela												

Figura 10 – Tabela que mostra o plano de lavra executado.

Na tabela da figura 10, conforme os despachos vão ocorrendo, é mostrada a atualização do números de viagens dos caminhões às frentes.

iv) Finalização e geração de relatório de turno

Finalizado o turno ou com o surgimento da necessidade de parar a operação, clica-se no botão “*Finish*” (Finalizar). Ao clicar nesse botão, o despachador poderá utilizar o “*Reinit*” (Reiniciar) para dar reinício ao processo, gerar um relatório de turno com as informações mais relevantes que ocorreram no intervalo de tempo em que o sistema estava operando, ou fechar a aplicação. Para reiniciar, no menu “*File*” (Arquivo), clica-se em “*Reinit*” e todos os campos serão reinicializados, o sistema estará pronto para ser reinicializado. Para gerar o relatório, no menu “*Export*” (Exportar), clica-se em “*Shift Report*” (Relatório de turno) e será gerado e salvo, em local da preferência do usuário, um relatório contendo informações como plano de lavra, plano executado de lavra, número de viagens realizadas por caminhão, lista de viagens contendo a hora do despacho e a frente para a qual o caminhão foi despachado, produção das frentes, produção de minério, movimentação de estéril, produção total, relação estéril-minério e o teor dos parâmetros de controle da qualidade da mistura no final do turno. Para finalizar, no menu “*File*”, clicar em “*Exit*” (Sair).

No menu “*Help*” (Ajuda), clicando em “*About*” (Sobre) as informações básicas do aplicativo são apresentadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Plano Otimizado de Lavra

Como resultado da otimização, foi obtido um plano otimizado de lavra mostrado na figura 11. Nessa figura, a variável operacional indica se o caminhão está ou não em atividade, sendo binária, se a variável for “0” o caminhão está inoperante, se for “1” ele está em operação. Ainda na figura 11, TxUtz (%) é a taxa de utilização calculada. Pelo modelo, a escavadeira 1 foi alocada à frente de minério 5, a escavadeira 2 à frente de minério 3, e a escavadeira 3 à frente de estéril 2. A produção programada das frentes de minério 3 e 5 são, respectivamente, 3000t e 5400t, e a movimentação da frente de estéril 2 é de 3810t. Dos nove parâmetros de qualidade, cinco estão em conformidade com os limites da usina, e quatro desviaram (conforme mostrado na tabela 5): a sílica desviou 0,01 (alcançou 8,01, mas o limite superior é de 8,00); a alumina desviou 0,52 (alcançou 3,42, mas o limite superior é de 2,90); a perda por calcinação desviou 0,97 (alcançou 4,57, mas o limite superior é de 3,60); e o retido na malha de 0,15 mm desviou 2,1 (alcançou 56,1, mas o limite superior é de 54,0). A relação estéril-minério foi de 0,45. Assim, com ligeiros desvios em parâmetros cujos pesos não eram prioritários, obteve-se um plano ótimo adequado (a solução encontrada foi a solução ótima). Outros resultados poderiam ser obtidos através da alteração dos pesos atribuídos, entretanto, outros desvios em outros parâmetros de controle da qualidade da mistura surgiriam.

Frota de caminhões: capacidade (t) e número de viagens												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	60	60	60	60	60	60	60	90	90	90	90	90
M1												
M2												
M3		2						2	14	7	1	8
M4												
M5		15		20		20	20			10		
E1												
E2		2						15	2		16	8
Operacional	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
TxUtz (%)		88		89		89	89	88	87	86	88	85

Figura 11 – Quadro com o plano operacional de lavra otimizado, variável operacional e taxa de utilização, resultados do modelo de otimização.

Tabela 5 – Teores da mistura de minério encontrados pelo modelo de otimização.

Parâmetros (%)	Frentes de minério					Limites usina		Teor da Mistura (%)
	M1	M2	M3	M4	M5	Mín	Máx	
Fe	58,00	45,93	57,50	51,05	60,10	56,00	60,00	59,20
SiO ₂	14,52	23,42	8,20	18,95	7,90	4,00	8,00	8,01
Al ₂ O ₃	1,02	5,25	2,57	1,16	3,89	1,30	2,90	3,42
Mn	0,36	0,16	0,34	0,68	0,12	0,05	0,35	0,20
P	0,051	0,030	0,098	0,080	0,094	0,060	0,100	0,095
PPC	1,52	4,22	6,91	4,76	3,28	3,40	3,60	4,57
+6,30mm	23,10	30,90	22,25	31,40	22,40	20,00	26,00	22,30
-6,3+0,15	50,80	44,70	48,20	46,30	50,50	50,00	54,00	56,10
-0,15mm	23,90	21,90	24,75	18,40	15,00	18,00	22,00	18,50

5.2. Sistema Computacional

Para a verificação da conformidade com os resultados do plano de lavra otimizado, foram simuladas as viagens no *goTruck*. Após a entrada dos dados, as tabelas de dados são preenchidas (figura 12) e se dá a alocação inicial (figura 13).

Mining Management - Data

Bench Grades (%)

Bench	Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P	LOI	+6,30mm	+0,15mm	-0,15mm
O1	58.0	14.52	1.02	0.36	0.051	1.52	23.1	50.8	23.9
O2	45.93	23.42	5.25	0.16	0.03	4.22	30.9	44.7	21.9
O3	57.5	8.2	2.57	0.34	0.098	6.91	22.25	48.2	24.8

Plant Boundaries (%)

Boundaries	Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P	LOI	+6,30mm	+0,15mm	-0,15mm
UB	60.0	8.0	2.9	0.35	0.1	3.6	26.0	54.0	22.0
LB	56.0	4.0	1.3	0.05	0.06	3.4	20.0	50.0	18.0

Truck Capacities (t)

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
60	60	60	60	60	60	60	90	90	90	90	90

Optimized Mine Plan

Bench	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
O1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O3	0	2	0	0	0	0	0	2	14	7	1	8
O4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O5	0	15	0	20	0	20	20	0	0	10	0	0
W1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W2	0	2	0	0	0	0	0	15	2	0	16	8

Figura 12 – Tabelas preenchidas com os dados de entrada.

Mining Management - Position of trucks in the mine

Allocate ☒

	Inoperative	Origin Bench	Loading Queue	Loading	Full Haulage	Crusher Queue	Crusher Discharge	Waste Rock Dump Queue	Waste Rock Dump Discharge	Empty Haulage	Supply Queue	Supply
T1	☒		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T2	☐	O3	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T3	☒		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T4	☐	O5	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T5	☒		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
T6	☐	O5	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐
T7	☐	O5	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐
T8	☐	W2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐
T9	☐	O3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐
T10	☐	O5	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒
T11	☐	W2	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐
T12	☐	O3	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐

Figura 13 – Distribuição da posição dos caminhões na mina, representando uma alocação inicial.

Ao selecionar um caminhão na caixa de seleção, o sistema está apto a fazer o despacho. Como exemplo, o caminhão 2, de 60t de capacidade, tem duas viagens programadas para a frente de minério 3, quinze para a frente de minério 5, e duas para a frente de estéril 2. A decisão para qual frentes ele será alocado se dá através do cálculo do desvio dessas três frentes em relação à meta de produção por frente. Em um dado momento do turno, os desvios dessas três frentes são, respectivamente, 97,0%, 97,8% e 97,6%. Assim, o caminhão será despachado para a frente de minério 5, pois essa apresenta o maior desvio. Os valores antes e depois do despacho podem ser vistos nas figuras 14 e 15. Ao contrário do modelo de otimização, que trabalha com os tempos médios de ciclo dos caminhões (valores determinísticos), o sistema de despacho opera em tempo real, considerando, dessa forma, o tempo no qual as atividades serão concluídas. Por isso, pode acontecer de o plano executado de lavra se mostrar ligeiramente diferente do plano otimizado ao final do turno.

Mining Managment - Decision Making

	Planned Production (t)	Current Production (t)	Deviation (%)	
O1				☐
O2				☐
O3	3.000	90	97,0	☒
O4				☐
O5	5.400	120	97,8	☒
W1				☐
W2	3.810	90	97,6	☒

Date: 19/04/2021 Time: 21:41:15

Select the truck for dispatch:

Productions (t):

Ore	Waste	Stripping Ratio	Total
210	90	0,43	300

Figura 14 – Momento anterior ao despacho do caminhão 2.

Mining Managment - Decision Making

Date: 19/04/2021 Time: 21:42:58

	Planned Production (t)	Current Production (t)	Deviation (%)	
O1				☐
O2				☐
O3	3.000	90	97,0	☒
O4				☐
O5	5.400	180	96,7	☒
W1				☐
W2	3.810	90	97,6	☒

Select the truck for dispatch:

Productions (t):

Ore	Waste	Stripping Ratio	Total
270	90	0,33	360

Figura 15 – Momento posterior ao despacho do caminhão 2.

Após as viagens realizadas, o campo de despacho apresenta as produções e o teor da mistura final (figura 16). Também, é possível ver quantas viagens os caminhões realizaram a cada frente de lavra (figura 17).

Mining Managment - Decision Making

Date: 19/04/2021 Time: 21:12:12

	Planned Production (t)	Current Production (t)	Deviation (%)	
O1				☐
O2				☐
O3	3.000	3000	0.0	☒
O4				☐
O5	5.400	5400	0.0	☒
W1				☐
W2	3.810	3810	0.0	☒

Select the truck for dispatch:

Productions (t):

Ore	Waste	Stripping Ratio	Total
8400	3810	0,45	12210

Current Grade

Fe	SiO2	Al2O3	Mn	P	LOI	+6,30mm	+0,15mm	-0,15mm
59,17	8,01	3,42	0,20	0,095	4,58	22,35	56,11	18,50

☒ ☐ ☐ ☒ ☒ ☐ ☒ ☐ ☒

Figura 16 – Campo do despacho ao final de um turno.

Mining Managment - Executed Mining Plan

Bench	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
O1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O3	0	2	0	0	0	0	0	2	14	7	1	8
O4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O5	0	15	0	20	0	20	20	0	0	10	0	0
W1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W2	0	2	0	0	0	0	0	15	2	0	16	8

Figura 17 – Plano de lavra executado ao final de um turno.

Ao final do turno, é possível a exportação de um relatório com as informações mais relevantes que ocorreram no decorrer do turno (o relatório está no Apêndice 3). As informações básicas do projeto são mostradas em “Help” – “About” (Figura 18).

1.0.0 goTruck® - About

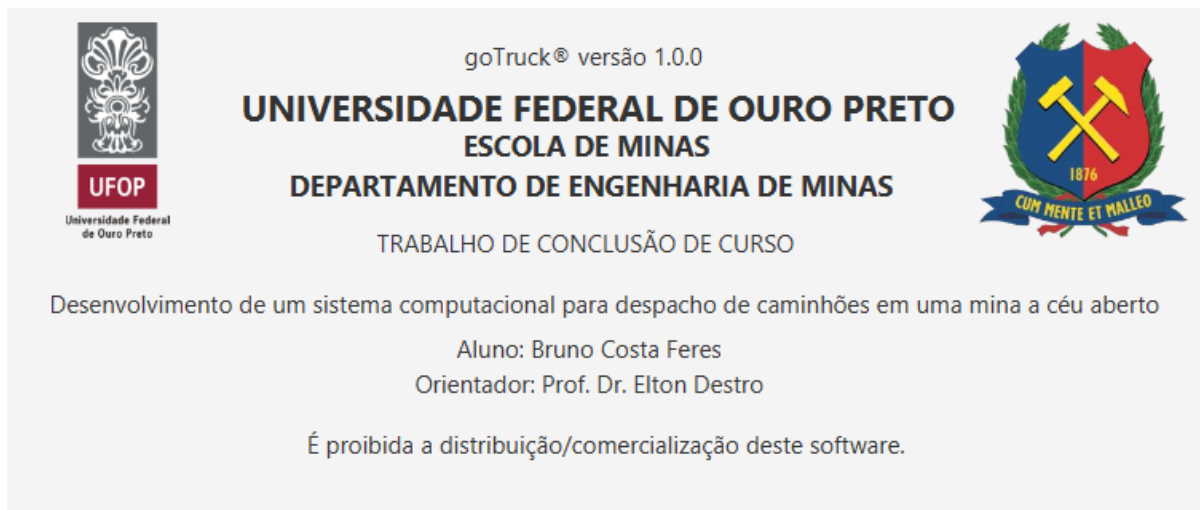


Figura 18 – About – informações básicas do projeto.

6. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho, foi possível desenvolver um sistema computacional de despacho de caminhões, chamado *goTruck*, que pode auxiliar a operação de mina em lavra a céu aberto, minimizando os desvios em relação às metas de produção e qualidade da mistura de minérios. Além disso, o software desenvolvido facilita a compreensão da alocação dinâmica de caminhões, podendo ser uma interessante ferramenta didático-pedagógica.

O aplicativo utiliza um plano otimizado de lavra, cujo modelo foi desenvolvido utilizando-se a técnica de programação por metas. Assim, parâmetros relacionados à produção, qualidade e à relação estéril-minério são respeitados, sendo as metas atingidas com o número de caminhões em operação reduzido. Os resultados almejam as metas, entretanto, se não for possível seu alcance, os resultados ficarão tão próximos quanto possível for delas. Todo sistema foi construído considerando-se parâmetros realísticos, buscando a potencial utilização na prática, ou seja, replicabilidade no mundo real.

Por fim, a realização desse trabalho demonstrou a importância da aproximação dos profissionais de mineração, especificamente os Engenheiros de Minas, com as técnicas de programação. Pois, através delas, é possível a implementação de soluções viáveis, econômicas e inovadoras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, F. C. R. de. **Planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões: abordagens exata e heurística.** 2008.

BARBOSA, M. A.; ZANARDINI, A. D. **Iniciação à pesquisa operacional no ambiente de gestão.** 3a ed. Curitiba: Atual, 2015.

BREGALDA, P. F.; OLIVEIRA, A. A. F.; BORNSTEIN, C. T. **Introdução à programação linear.** Rio de Janeiro. Campus, Bregalda, 1988.

BUENO, A. F.; OLIVEIRA, M. C. **Pesquisa Operacional para decisão em contabilidade e administração.** Editora Atlas, São Paulo, 2004.

ÇETIN, N. **Open pit truck/shovel haulage system simulation.** 2004.

CHANDA, E. K. C.; DAGDELEN, K. **Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems.** International Journal of Surface Mining and Reclamation, v. 9, n. 4, 1995.

CHIRONIS, N. P. **Computer monitors and controls all truck-shovel operations.** Coal Age;(United States), v. 90, n. 3, 1985.

COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral Ouro Preto, 2005.

DESTRO, E. **Software para Planejamento Operacional de Lavra, Simulação e Despacho de Caminhões Visando ao Atendimento das Metas de Produção e Qualidade da Mistura de Minérios,** Tese - UFOP, 155p., 2015.

GERSHON, M. **A linear programming approach to mine scheduling optimization.** In: 17th APCOM. 1982.

KOLONJA, B; KALASKY, D. R.; MUTMANSKY, J. M. **Optimization of dispatching criteria for open-pit truck haulage system design using multiple comparisons with the best and common random numbers.** In: Proceedings of the 25th conference on Winter simulation. 1993.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa operacional.** Rio de Janeiro, 2002. Apostila. Disponível em: <https://ericolisboa.eng.br/cursos/apostilas/po/po.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

MARAN, J.; TOPUZ, E. **Simulation of truck haulage systems in surface mines.** International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, v. 2, n. 1, 1988.

PINTO, E. B. **Despacho de caminhões em mineração usando lógica nebulosa, visando ao atendimento simultâneo de políticas excludentes.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007.

PINTO, L. R.; BIAJOLI, F. L.; MINE, O. M. **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, 2003.

ROMERO, C. **A general structure of achievement function for a goal programming model.** European Journal of Opera, 2004.

SAAYMAN, P.; CRAIG, I. K.; CAMISANI-CALZOLARI, F. R. **Optimization of an autonomous vehicle dispatch system in an underground mine.** Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 106, n. 2, 2006.

SOUMIS, F.; ETHIER, J.; ELBROND, J. **Truck dispatching in an open pit mine.** International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, v. 3, n. 2, 1989.

TU, J. H.; HUCKA, V. J. **Analysis of open-pit truck haulage system by use of a computer-model.** CIM bulletin, v. 78, n. 879, 1985.

APÊNDICE 1 – Modelo de otimização (Otimizador LINGO)

Model:

Title: POLAV_TCC;

sets: !Variáveis do modelo.

parametros: tl, tu, wtn, wtp, dtn, dtp;

!parametros: parâmetros de controle da qualidade da mistura

!tl e tu: limites inferior e superior dos parâmetros de controle da qualidade da mistura, respectivamente.

!wtm e wtp: pesos negativo e positivo, atribuídos aos parâmetros de controle da qualidade da mistura, respectivamente.

!dtn e dtp: desvios negativo e positivo dos parâmetros de controle da qualidade da mistura, respectivamente.

frentes: x, EstMin;

!frentes: frentes de minério ou estéril.

!x: produção nas frentes.

!EstMin: 1 para frente de minério e 0 para de estéril.

frentesMin;; !frentesMin: frentes de minério.

carregadeiras: Cmin, Cmax;

!carregadeiras: as três carregadeiras da mina.

!Cmax: produção/h máxima. Cmin: produção/h mínima. Para cada equipamento de carga.

caminhoes: capCam, operacional;

!caminhoes: os 12 caminhões da mina.

!capCam: capacidade dos caminhões.

!operacional: variável binária relacionada ao número de caminhões em operação, 1 se está operante, 0 se não.

matriz1(parametros, frentesMin): t;

!t: teor nas frentes de minério.

matriz2(frentes,carregadeiras): y;

!y: alocação das carregadeiras às frentes.

matriz3(frentes,caminhoes): n, tempoCiclo;

!n: número de viagens dos caminhões às frentes.

!tempoCiclo: tempos de ciclo dos caminhões.

endsets

data: !Indicação de onde as variáveis estão posicionadas na planilha Excel.

```
parametros = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'parametros');
```

```
frentes, EstMin = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'frentes', 'EstMin');
```

```
frentesMin = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'frentesMin');
```

```
carregadeiras, caminhoes = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'carregadeiras', 'caminhoes');
```

```
t = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 't');
```

```
tl, tu = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'tl', 'tu');
```

```
Pl, Pu = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'Pl', 'Pu'); !Pl e Pu: produções mínima e máxima, respectivamente.
```

```
Cmin, Cmax = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'Cmin', 'Cmax');
```

```
remMin, remMax = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'remMin', 'remMax');
```

!remMin: relação estéril-minério mínima. remMax: relação estéril-minério máxima.

```
capCam = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'capCam');
```

```
TempoCiclo = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'TempoCiclo');
```

```
wpn, wpp, wtn, wtp = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'wpn', 'wpp', 'wtm', 'wtp');
```

!wpn e wpp, pesos negativo e positivo, atribuídos à produção, respectivamente.

```
nHoras = @ole('POLAV_TCC.xlsx', 'nHoras'); !número de horas trabalhadas no turno (6h).
```

Poperacional = 10; !Poperacional: Penalidade pelo uso dos caminhões.

TxUtzMin = 0.70; !TxUtzMin: Taxa de utilização mínima dos caminhões.

TxUtzMax = 0.90; !TxUtzMax: Taxa de utilização máxima dos caminhões.

enddata

!Função Objetivo [FO]:

[FO] min = wpn*dpn + wpp*dpp

+ @sum(parametros(i): wtn(i)*dtn(i) + wtp(i)*dtp(i))

+ @sum(caminhoes(l): Poperacional*operacional(l));

!Restrições

!Produção de minério.

@sum(frentesMin(i): x(i)) - nHoras*Pl + dpn >= 0;

@sum(frentesMin(i): x(i)) - nHoras*Pu - dpp <= 0;

!Parâmetros de controle da qualidade da mistura: teores e faixas granulométricas.

@for(parametros(i): @sum(frentes(j)|EstMin(j)#eq#1: (t(i,j) - tl(i))*x(j)) + dtn(i) >= 0);

@for(parametros(i): @sum(frentes(j)|EstMin(j)#eq#1: (t(i,j) - tu(i))*x(j)) - dtp(i) <= 0);

!Relação estéril-minério.

@sum(frentes(i)|EstMin(i)#eq#0: x(i)) - remMin*@sum(frentes(i)|EstMin(i)#eq#1: x(i)) >= 0;

@sum(frentes(i)|EstMin(i)#eq#0: x(i)) - remMax*@sum(frentes(i)|EstMin(i)#eq#1: x(i)) <= 0;

!Deve haver no máximo uma carregadeira k operando na frente i.

@for(frentes(i): @sum(carregadeiras(k): y(i,k)) <= 1);

!Cada carregadeira k deve operar em uma única frente i.

@for(carregadeiras(k): @sum(frentes(i): y(i,k)) <= 1);

!A produção na frente i não deve ser menor que nHoras*Cmin.

@for(frentes(i): x(i) >= @sum(carregadeiras(k): nHoras*Cmin(k)*y(i,k)));

!A produção na frente i não deve ser maior que nHoras*Cmax.

@for(frentes(i): x(i) <= @sum(carregadeiras(k): nHoras*Cmax(k)*y(i,k)));

!O ritmo de lavra da frente i deve ser igual à produção dos caminhões alocados à frente.

@for(frentes(i): x(i) = @sum(caminhoes(l): n(i,l)*capCam(l)));

!Cada caminhão deve operar no máximo nHoras*60*TxUtzMax.

@for(caminhoes(l): @sum(frentes(i): n(i,l)*tempoCiclo(i,l)) <= nHoras*60*TxUtzMax*operacional(l));

!Cada caminhão deve operar no mínimo nHoras*60*TxUtzMin.

@for(caminhoes(l): @sum(frentes(i): n(i,l)*tempoCiclo(i,l)) >= nHoras*60*TxUtzMin*operacional(l));

!Restrição usada para determinar o valor da variável operacional.

```
@for(caminhoes(l): @sum(frentes(i): n(i,l)*tempoCiclo(i,l))/(nHoras*60) <= operacional(l));
```

!y é uma variável binária.

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

!n é uma variável inteira.

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

!operacional é uma variável binária.

```
@for(caminhoes(l): @bin(operacional(l)));
```

data: !Indicação de onde os resultados serão inseridos na planilhaExcel.

```
@ole('POLAV_TCC.xlsx','x','y','n','operacional','FO') = x, y, n, operacional, FO;
```

```
@ole('POLAV_TCC.xlsx','dpp','dpn','dtp','dtn') = dpp, dpn, dtp, dtn;
```

!dpn e dpp: desvios negativo e positivo da produção.

```
enddata
```

```
end
```

APÊNDICE 2 – Dados de entrada

```
p1,58.00,14.52,1.02,0.36,0.051,1.52,23.10,50.80,23.90
02,45.93,23.42,5.25,0.16,0.030,4.22,30.90,44.70,21.90
03,57.50,8.20,2.57,0.34,0.098,6.91,22.25,48.20,24.80
04,51.05,18.95,1.16,0.68,0.080,4.76,31.40,46.30,18.40
05,60.10,7.90,3.89,0.12,0.094,3.28,22.40,60.50,15.00
W1,29.73,44.74,4.97,0.61,0.074,5.71,26.70,59.90,12.60
W2,39.64,37.46,2.31,0.29,0.069,2.68,28.60,45.80,25.60
```

Arquivo .txt (.csv) do teor das frentes utilizado como entrada do sistema computacional

```
UB,60.00,8.00,2.90,0.35,0.100,3.60,26.00,54.00,22.00
LB,56.00,4.00,1.30,0.05,0.060,3.40,20.00,50.00,18.00
```

Arquivo .txt (.csv) do limite da usina utilizado como entrada do sistema computacional

```
||60,60,60,60,60,60,60,90,90,90,90,90
```

Arquivo .txt (.csv) das capacidades dos caminhões utilizado como entrada do sistema computacional

```
p1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
02,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
03,0,2,0,0,0,0,0,0,2,14,7,1,8
04,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
05,0,15,0,20,0,20,20,0,0,10,0,0
W1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
W2,0,2,0,0,0,0,0,15,2,0,16,8
```

Arquivo .txt (.csv) do plano de lavra utilizado como entrada do sistema computacional

APÊNDICE 3 – Relatório de turno (Exemplo da simulação)

Shift report - 06/04/2021 - 17:31:46

Mine Plan

[Bench=O1, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=O2, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=O3, T1=0, T2=2, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=2, T9=14, T10=7, T11=1, T12=8]
 [Bench=O4, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=O5, T1=0, T2=15, T3=0, T4=20, T5=0, T6=20, T7=20, T8=0, T9=0, T10=10, T11=0, T12=0]
 [Bench=W1, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=W2, T1=0, T2=2, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=15, T9=2, T10=0, T11=16, T12=8]

Executed Mine Plan

[Bench=O1, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=O2, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=O3, T1=0, T2=2, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=2, T9=14, T10=7, T11=1, T12=8]
 [Bench=O4, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=O5, T1=0, T2=15, T3=0, T4=20, T5=0, T6=20, T7=20, T8=0, T9=0, T10=10, T11=0, T12=0]
 [Bench=W1, T1=0, T2=0, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=0, T9=0, T10=0, T11=0, T12=0]
 [Bench=W2, T1=0, T2=2, T3=0, T4=0, T5=0, T6=0, T7=0, T8=15, T9=2, T10=0, T11=16, T12=8]

Truck Trips

[T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12]
 [0, 19, 0, 20, 0, 20, 20, 17, 16, 17, 17, 16]

Travel List

T2 -> O5 at 17:00:14	T4 -> O5 at 17:17:14	T6 -> O5 at 17:18:22	T7 -> O5 at 17:19:32
T2 -> W2 at 17:16:09	T4 -> O5 at 17:17:16	T6 -> O5 at 17:18:24	T8 -> W2 at 17:19:38
T2 -> O3 at 17:16:14	T4 -> O5 at 17:17:18	T6 -> O5 at 17:18:26	T8 -> O3 at 17:19:42
T2 -> O5 at 17:16:16	T4 -> O5 at 17:17:20	T6 -> O5 at 17:18:29	T8 -> W2 at 17:19:46
T2 -> W2 at 17:16:17	T4 -> O5 at 17:17:22	T6 -> O5 at 17:18:32	T8 -> O3 at 17:19:51
T2 -> O5 at 17:16:18	T4 -> O5 at 17:17:24	T6 -> O5 at 17:18:35	T8 -> W2 at 17:19:52
T2 -> O3 at 17:16:20	T4 -> O5 at 17:17:26	T6 -> O5 at 17:18:37	T8 -> W2 at 17:19:54
T2 -> O5 at 17:16:21	T4 -> O5 at 17:17:31	T7 -> O5 at 17:18:48	T8 -> W2 at 17:19:56
T2 -> O5 at 17:16:22	T4 -> O5 at 17:17:34	T7 -> O5 at 17:18:51	T8 -> W2 at 17:19:58
T2 -> O5 at 17:16:23	T4 -> O5 at 17:17:36	T7 -> O5 at 17:18:53	T8 -> W2 at 17:20:01
T2 -> O5 at 17:16:39	T4 -> O5 at 17:17:38	T7 -> O5 at 17:18:55	T8 -> W2 at 17:20:03
T2 -> O5 at 17:16:42	T4 -> O5 at 17:17:40	T7 -> O5 at 17:18:58	T8 -> W2 at 17:20:07
T2 -> O5 at 17:16:44	T4 -> O5 at 17:17:43	T7 -> O5 at 17:19:00	T8 -> W2 at 17:20:09
T2 -> O5 at 17:16:47	T6 -> O5 at 17:17:47	T7 -> O5 at 17:19:02	T8 -> W2 at 17:20:12
T2 -> O5 at 17:16:49	T6 -> O5 at 17:17:50	T7 -> O5 at 17:19:04	T8 -> W2 at 17:20:14
T2 -> O5 at 17:16:50	T6 -> O5 at 17:18:01	T7 -> O5 at 17:19:06	T8 -> W2 at 17:20:16
T2 -> O5 at 17:16:53	T6 -> O5 at 17:18:03	T7 -> O5 at 17:19:07	T8 -> W2 at 17:20:19
T2 -> O5 at 17:16:55	T6 -> O5 at 17:18:05	T7 -> O5 at 17:19:09	T8 -> W2 at 17:20:21
T2 -> O5 at 17:16:57	T6 -> O5 at 17:18:07	T7 -> O5 at 17:19:11	T9 -> O3 at 17:20:31
T4 -> O5 at 17:17:02	T6 -> O5 at 17:18:09	T7 -> O5 at 17:19:13	T9 -> O3 at 17:20:35
T4 -> O5 at 17:17:04	T6 -> O5 at 17:18:11	T7 -> O5 at 17:19:15	T9 -> O3 at 17:20:37
T4 -> O5 at 17:17:05	T6 -> O5 at 17:18:13	T7 -> O5 at 17:19:18	T9 -> O3 at 17:20:39
T4 -> O5 at 17:17:07	T6 -> O5 at 17:18:15	T7 -> O5 at 17:19:20	T9 -> O3 at 17:21:00
T4 -> O5 at 17:17:09	T6 -> O5 at 17:18:17	T7 -> O5 at 17:19:21	T9 -> O3 at 17:21:03
T4 -> O5 at 17:17:11	T6 -> O5 at 17:18:18	T7 -> O5 at 17:19:24	T9 -> O3 at 17:21:06
T4 -> O5 at 17:17:13	T6 -> O5 at 17:18:20	T7 -> O5 at 17:19:29	T9 -> O3 at 17:21:08

T9 -> O3 at 17:21:10
T9 -> O3 at 17:21:13
T9 -> W2 at 17:21:15
T9 -> O3 at 17:21:19
T9 -> W2 at 17:21:21
T9 -> O3 at 17:21:24
T9 -> O3 at 17:21:31
T9 -> O3 at 17:21:35
T10 -> O3 at 17:21:41
T10 -> O3 at 17:21:43
T10 -> O3 at 17:21:45
T10 -> O3 at 17:21:48
T10 -> O3 at 17:21:50
T10 -> O3 at 17:21:52
T10 -> O3 at 17:21:54

T10 -> O5 at 17:21:57
T10 -> O5 at 17:22:01
T10 -> O5 at 17:22:03
T10 -> O5 at 17:22:05
T10 -> O5 at 17:22:07
T10 -> O5 at 17:22:09
T10 -> O5 at 17:22:11
T10 -> O5 at 17:22:18
T10 -> O5 at 17:22:20
T10 -> O5 at 17:22:23
T11 -> W2 at 17:22:34
T11 -> W2 at 17:22:39
T11 -> W2 at 17:22:43
T11 -> W2 at 17:22:45
T11 -> W2 at 17:22:47

T11 -> W2 at 17:23:06
T11 -> W2 at 17:23:08
T11 -> W2 at 17:23:10
T11 -> W2 at 17:23:13
T11 -> W2 at 17:23:17
T11 -> W2 at 17:23:19
T11 -> W2 at 17:23:21
T11 -> W2 at 17:23:23
T11 -> O3 at 17:23:25
T11 -> W2 at 17:23:28
T11 -> W2 at 17:23:31
T11 -> W2 at 17:23:33
T12 -> O3 at 17:23:39
T12 -> O3 at 17:23:43
T12 -> W2 at 17:23:45

T12 -> O3 at 17:23:48
T12 -> W2 at 17:23:50
T12 -> O3 at 17:23:52
T12 -> W2 at 17:23:54
T12 -> W2 at 17:23:56
T12 -> O3 at 17:23:59
T12 -> W2 at 17:24:01
T12 -> O3 at 17:24:03
T12 -> W2 at 17:24:06
T12 -> O3 at 17:24:10
T12 -> W2 at 17:24:13
T12 -> O3 at 17:24:16
T12 -> W2 at 17:24:20

Bench Production

[O1, O2, O3, O4, O5, W1, W2]

[0.0, 0.0, 3000.0, 0.0, 5400.0, 0.0, 3810.0]

Ore Production=8400.0

Waste Movement=3810.0

Total=12210.0

Stripping Ratio=0,45

Current Grade (in percentage)

[Fe=59,17; SiO₂=8,01; Al₂O₃=3,42; Mn=0,20; P=0,095; LOI=4,58; +50,00mm=22,35; +6,30mm=56,11; +0,15mm=18,50]

Na simulação, os despachos foram feitos sequenciados até o cumprimento do plano de lavra. Não foi esperado o tempo de ciclo para se efetuar o despacho. Isso foi feito para fins de comparação com os resultados obtidos pelo modelo, sendo os resultados considerados equivalentes.