

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e dos Materiais PPGEM

SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO EM MINA SUBTERRÂNEA POR
CONJUNTOS MECANIZADOS

SANDRO PINZON PEREIRA

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e dos Materiais PPGEM

SIMULAÇÃO DE PRODUÇÃO EM MINA SUBTERRÂNEA POR
CONJUNTOS MECANIZADOS

SANDRO PINZON PEREIRA
Engenheiro de Minas

Trabalho realizado do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do programa de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais-PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Porto Alegre
2004

Essa Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe – PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Salvadorette – DEMIN/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira
Coordenador do PPGEM

Dedicado à minha família, em especial ao meu pai.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Paulo Salvadoretti e José Antônio Kurcewicz pela ajuda e parceria no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor João Felipe pela orientação da dissertação e confiança no trabalho.

Aos profissionais da Carbonífera Metropolitana pelo suporte nos trabalhos.

Aos amigos do Laboratório de Pesquisa Mineral.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro recebido na forma de bolsa de estudo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.	x
LISTA DE TABELAS.xiii
RESUMO.	xv
ABSTRACT.	xvi

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 A simulação computacional na mineração..	1
1.1.1 Simuladores computacionais específicos para carvão.2
1.2 Motivação para o estudo.	4
1.3 Meta.6
1.4 Objetivos.6
1.5 Contribuições do trabalho.	7
1.6 Metodologia.7
1.7 Estrutura da dissertação.	8

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução.	9
2.2 Introdução à simulação..	9
2.3 Os objetivos da simulação.	10
2.4 As vantagens e desvantagens da simulação.11
2.4.1 Vantagens da simulação.11
2.4.2 Desvantagens da simulação.	12

2.5 Análise de Sistemas.	12
2.5.1 Modelos na análise de sistemas.	13
2.6 Sistemas discretos e contínuos.	14
2.6.1 Sistemas discretos.	14
2.6.2 Sistemas contínuos.	15
2.7 Modelo de um sistema.	16
2.7.1 Tipos de modelos.	16
2.7.1.1 Modelos determinísticos	17
2.7.1.2 Modelos estocásticos.	17
2.7.1.3 Modelos discretos e contínuos.	18
2.7.1.4 Modelo híbrido.	18
2.8 Simulação a eventos discretos.	19
2.8.1 Exemplos do uso da simulação a eventos discretos em mineração.	20
2.9 Procedimentos para uma simulação.	22
2.10 A linguagem Visual Basic.	23
2.11 Intervalo de confiança para a medida da diferença de performance de dois sistemas.	25

CAPÍTULO 3 – O CONJUNTO MECANIZADO E BANCO DE DADOS

3.1 Introdução.	28
3.2 Localização.	28
3.3 O sistema câmaras e pilares.	29
3.4 Métodos de produção.	30
3.5 Ciclo produtivo em um painel de lavra típico com uso de conjunto mecanizado.	33
3.6 Características do painel de lavra estudado.	34

3.7 Distribuição das tarefas no ciclo operacional.	35
3.8 Conjunto Mecanizado.	36
3.8.1 Parafusadora de teto.	36
3.8.2 Cortadeira.	38
3.8.3 Perfuratriz de frente.	39
3.8.4 <i>Loader</i>	40
3.8.5 <i>Shuttle car</i>	41
3.9 Problemas operacionais na condução da lavra.	42
3.9.1 Número de frentes ou galerias a serem utilizadas no painel de lavra.	43
3.9.2 Ordem de lavra.	43
3.9.3 Geometria da lavra.	43
3.9.4 Instabilidade no nível de produção.	44
3.9.5 Melhoria da ventilação.	45
3.9.6 Soluções para o problema proposto.	45
3.10 Turno de trabalho.	46
3.11 Banco de dados coletado.	47
3.11.1 Escoramento de teto.	47
3.11.2 Corte da camada de carvão.	50
3.11.3 Furação da face.	51
3.11.4 Desmonte.	52
3.11.5 Limpeza da frente com <i>loader</i> e <i>shuttle car</i>	53
3.12 Principais atividades realizadas em cada operação.	55
3.13 Tempos de esperas dos equipamentos.	61
3.14 Cálculo da produção por turno para cada equipamento.	63
3.15 Tempo máximo e mínimos para um ciclo total em uma frente.	64
3.16 Regressões de tempos de deslocamentos para os equipamentos	65

CAPÍTULO 4 – O SIMULADOR COMPUTACIONAL

4.1	Introdução.	68
4.2	O simulador.	68
4.2.1	Mecanismo de avanço do tempo.	70
4.2.1	Alocação de equipamentos e tempos de operação.	71
4.3	Geração dos tempos dos equipamentos.	72
4.3.1	Exemplo de composição dos tempos.	72
4.4	Módulos do simulador.	74
4.4.1	Módulo de posicionamento dos equipamentos.	75
4.4.2	Módulo de controle de contagem dos tempos totais, esperas e produção.	76
4.4.3	Módulo de controle dos tempos individuais dos equipamentos de lavra.	79
4.5	Validação do simulador.	80
4.5.1	Reprodução de um turno de trabalho no simulado.	80
4.5.2	Comparação entre produção real e simulada	82
4.5.3	Justificativa para o modelo de simulador escolhido.	83
4.6	Outras aplicações para o uso do simulador.	84

CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL

5.1	Introdução.	86
5.2	Situações a serem estudadas.	86
5.2.1	Situação A.	87
5.2.2	Situação B.	88
5.3	Análise dos resultados.	90

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

1.1	Introdução.	96
1.2	Conclusão.	96

1.3 Trabalhos futuros.	97
--------------------------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 99

Anexo 1.	102
-------------------------	------------

Anexo 2.	104
-------------------------	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de localização das frentes de lavra em Agosto de 2002.	5
Figura 1.2 Diagrama de localização das frentes de lavra idealizado.	6
Figura 2.1 Estado das variáveis vs. tempo para um modelo de evento discreto, adaptada de Yingling, 1992, SME.	15
Figura 2.2 Exemplo de uma variável contínua.	16
Figura 2.3 Saída de um modelo estocástico de um sistema produção, adaptada de Yingling, 1992, SME.	18
Figura 2.4 Passos para implementação de um processo de simulação.	22
Figura 3.1 Localização geral da cidade de Treviso.	28
Figura 3.2 Painel convencional de lavra (a) e painel para Lavra contínua (b), adaptado de Farmer, 1992, SME.	31
Figura 3.3 Ciclos produtivos para lavra convencional (a) e lavra contínua (b), adaptado de Farmer, 1992, SME.	32
Figura 3.4 Representação esquemática da seqüência de trabalho, Cummings & Given, 1973, SME.	33
Figura 3.5 Representação esquemática da sequênci a de trabalho e painel de lavra	35
Figura 3.6 Parafusadora de teto.	37
Figura 3.7 Cortadeira 15RU, Joy Mfg. Co.	38
Figura 3.8 Perfuratriz de frente.	39

Figura 3.9 <i>Loader</i> 14BU10-10-41, Joy Mfg. Co.	40
Figura 3.10 <i>Shuttle Car</i> 10SC-6, Joy Mfg. Co.	41
Figura 3.11 Avançamento irregular do Painel CM5 no mês de Novembro de 2002.	44
Figura 3.12 Distribuição de freqüências para a etapa de corte da camada de carvão.	56
Figura 3.13 Distribuição de freqüências para a etapa de limpeza da camada de carvão.	56
Figura 3.14 Distribuição de freqüências para a etapa de furação de face da camada de carvão.	57
Figura 3.15 Distribuição de freqüências para a etapa de transporte de explosivos.	58
Figura 3.16 Distribuição de freqüências para a etapa de transporte de acessórios.	58
Figura 3.17 Distribuição de freqüências para a etapa de carregamento de explosivo.	59
Figura 3.18 Distribuição de freqüências para a etapa de detonação.	59
Figura 3.19 Distribuição de freqüências para a etapa de carregamento e transporte de minério com uso de dois <i>shuttle cars</i>	60
Figura 3.20 Distribuição de freqüências para a etapa de carregamento e transporte de minério com uso de um <i>shuttle car</i>	61
Figura 3.21 Distribuição dos tempos de operação no ciclo total com a parafusadora 4 e dois <i>shuttle cars</i>	64
Figura 3.22 Distribuição dos tempos de operação no ciclo total com a parafusadora 10 e um <i>shuttle car</i>	65
Figura 4.1 Avanços do relógio do simulador.	70
Figura 4.2 Avanços pré-estabelecidos na simulação.	72
Figura 4.3 Módulo de controle de posicionamento de equipamentos.	75
Figura 4.4 Módulo de contagem do tempo de simulação e visualização dos tempos gerados por simulação.	77
Figura 4.5 Módulo de acréscimo de esperas por equipamento.	78
Figura 4.6 Módulo de contagem de serviços e toneladas transportadas.	78

Figura 4.7 Visão geral do módulo de edição dos tempos dos equipamentos..	79
Figura 4.8 Visão parcial do módulo de edição dos tempos dos equipamentos (perfuratriz 4)	80
Figura 4.9 Condição inicial do painel no dia 27 de agosto de 2002.	82
Figura 5.1 Condição inicial de simulação para as Situações A e B.	89
Figura 5.2 Produção diária real do mês de Agosto de 2002.	90
Figura 5.3 Produção diária simulada para a Situação A.	91
Figura 5.4 Produção diária simulada para a Situação B.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Principais atividades no turno total de trabalho.	46
Tabela 3.2 Atividades relacionadas ao escoramento de teto.	48
Tabela 3.3 Atividades da PT 10.	49
Tabela 3.4 Atividades da PT 4.	49
Tabela 3.5 Atividades relacionadas ao corte da camada de carvão.	50
Tabela 3.6 Atividades da Cortadeira.	51
Tabela 3.7 Atividades relacionadas à furação da face.	51
Tabela 3.8 Atividades da PF.	52
Tabela 3.9 Atividades relacionadas ao desmonte.	52
Tabela 3.10 Atividades do Blaster.	53
Tabela 3.11 Atividades relacionadas à limpeza de frentes.	54
Tabela 3.12 Limpeza com um <i>Shuttle car</i>	54
Tabela 3.13 Limpeza com dois <i>Shuttle car</i>	55
Tabela 3.14 Participação das principais atividades no ciclo de corte.	55
Tabela 3.15 Participação das principais atividades no ciclo de perfuração.	57
Tabela 3.16 Participação das principais atividades no ciclo de desmonte.	57
Tabela 3.17 Participação das principais atividades no ciclo de limpeza.	60
Tabela 3.18 Tempos médios de esperas por frentes.	62
Tabela 3.19 Percentual do tempo gasto em quebras.	62
Tabela 3.20 Comparação dos tempos medidos contra tempos estimados pelas equações de tempo de deslocamento.	66
Tabela 4.1 Atividades relacionadas à furação da camada de carvão.	73
Tabela 4.2 Tempos médios por frente das atividades auxiliares a furação da camada de carvão.	74
Tabela 4.3 Resultado final a comparação entre simulação e operação real.	81
Tabela 4.4 Número de frentes limpas simuladas.	83
Tabela 5.1 Número médio de frentes trabalhadas por turno na situação A.	87
Tabela 5.2 Número de frentes limpas em cada dia na situação A.	88

Tabela 5.3 Número médio de frentes trabalhadas por turno na situação B.	89
Tabela 5.4 Número de frentes limpas em cada dia na situação B.	89
Tabela 5.5 Número de frentes limpas em cada dia na situação real.	90
Tabela 5.6 Comparação entre tonelagens médias por dia obtidas.	92
Tabela 5.7 Comparação entre situações simuladas.	92
Tabela 5.8 Tabela de comparação entre simulações A e real.	93
Tabela 5.9 Tempos médios de espera por turno real e simulado (A).	94

RESUMO

O sistema de lavra por conjunto mecanizado teve seu apogeu nas décadas de 50 e 60, dando lugar posteriormente ao sistema de mineração com minerador contínuo. No Brasil, conjuntos mecanizados ainda são utilizados em mineração de carvão em subsolo, na região sul de Santa Catarina.

O objetivo do trabalho foi desenvolver um sistema computacional onde todas as etapas necessárias à extração do carvão estivessem presentes, incluindo o escoramento de teto, corte de camada, perfuração de frente, carregamento de explosivos e transporte do minério. Para tal, idealizou-se um modelo de simulador para o sistema câmaras e pilares para auxiliar na ordenação da ocupação das frentes de lavra

A técnica de simulação utilizada é denominada simulação por eventos discretos é amplamente utilizada em Engenharia de produção. O simulador de produção foi construído e validado de forma a retratar a configuração real do painel, podendo-se alterar alguns parâmetros dos tempos de operação de cada equipamento, de configuração de painel, esquema de turnos de trabalho. Ao final do trabalho, se exemplifica o uso do simulador computacional.

ABSTRACT

The mechanized mining system for coal had its peak in the 50s and 60s, being later replaced by the continuous mining system. In Brazil, the system with loader and shuttle cars is still used in the underground coal mining in the southern region of Santa Catarina.

The aim of this work was to develop a computational system where all necessary stages for the coal extraction were present, including roof support, cutting, drilling, explosive loading and ore transportation.

The simulation technique used is called simulation by discrete events and is widely used in engineering. The production simulator was constructed and validated so as to portray the real configuration of the panel, being possible to modify some running time parameters of each equipment, of panel configuration, and of working shifts project. To the end of the work, an example shows the use of the computational simulator.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 A simulação computacional na mineração

Os estudos de simulação de operação de lavra na mineração iniciaram nos anos 60 e deram um grande passo juntamente com o avanço da computação. Muito dos problemas existentes na mineração vem da necessidade de se organizar os equipamentos utilizados em um trabalho mineiro de forma a minimizar, por exemplo, os tempos de deslocamento de equipamentos, tempos de esperas e tornar o tráfego mais organizado. Em suma, aproveitar ao máximo a capacidade de cada equipamento em fazer o seu trabalho.

Com o advento dos computadores pessoais e a facilidade de escrever e depurar erros de programas rapidamente, o engenheiro de minas tem tido novas ferramentas para ser assistido (Sturgul, 2000). Um dos primeiros trabalhos foi feito por Koenigsberg (1958), onde foi dada uma solução matemática a um problema de organização das operações unitárias em minas de carvão subterrâneas. Koenigsberg resolveu o problema de determinar a produção em uma mina de carvão onde dispunha de cinco equipes e cinco frentes. Cada equipe, após fazer o seu trabalho, deveria mudar para frente seguinte, porém a frente poderia estar vazia ou ainda sendo trabalhada, forçando a equipe a ter que esperar.

Rist (1961) publicou o primeiro trabalho de simulação por computador, onde o objetivo era achar o número ótimo de trens necessários para fazer o transporte do minério em uma mina subterrânea

de molibdênio. Seu trabalho esteve presente na primeira edição do APCOM (Application of Computers and Operations Research in Mineral Industry).

Suboleski e Lucas (1969) dedicaram - se a estudar as operações no sistema de câmaras e pilares.

Um dos sistemas mais amplamente estudados em mineração é sem dúvida o sistema caminhão-escavadeira utilizado na mineração a céu aberto. Envolve basicamente certo número de caminhões e uma escavadeira, um ponto de carregamento e descarga, e uma distância de transporte. É de se presumir, que tal distância venha a mudar conforme o andamento da lavra, interferindo assim diretamente na produção do sistema. Pode se observar que o sistema é sempre estudado de forma independente das outras atividades de lavra, as quais seriam, por exemplo, a perfuração da malha de furação e o posterior carregamento de explosivos para o desmonte.

No que toca à operação em mina subterrânea usando-se o método de câmaras e pilares, e especificamente ao carvão, tem-se a necessidade de que o estudo abranja todas as operações. O que fica então explícita é a complexidade de se analisar um sistema onde nenhuma etapa pode ser estudada de forma independente, e mais especificamente em um local relativamente pequeno, juntamente com vários tipos de equipamentos como é um painel de lavra no sistema câmaras e pilares.

1.1.1 Simuladores computacionais específicos para carvão

A partir da década de 60, motivados pela necessidade de otimização das tarefas, alguns simuladores específicos para mina de carvão foram desenvolvidos. Sturgul (2001) cita alguns dos trabalhos:

i. FACESIM (FACE operations SIMulator) de Ramachandran (1983) foi provavelmente o primeiro simulador. O simulador utilizava três *shuttle cars*, um *loader* e um ponto de descarga, escrito em FORTRAN;

ii. CONSIM (Topuz et al., 1989) foi um simulador pós FACESIM que possuía a capacidade de contagem de quebras de equipamentos. O simulador CONSIM foi usado em todo o mundo;

iii. Outro programa em Fortran foi escrito em 1969 com o nome de SIMULATOR 1, que simulava as operações em sistema câmaras e pilares (Manula and Suboleski, 1982);

iv. O Departamento de Engenharia Mineral de Penn State University, lançou o Underground Materials Handling Simulator (UGMHS). O UGMHS é dividido em diferentes seções onde cada uma simula uma operação unitária. O programa foi usado na análise de produtividade bem como na parte de viabilidade econômica;

vi. MPASS-2, de 1983, permite a escolha entre o sistema convencional ou contínuo de mineração (Haycocks, 1983).

Várias linguagens de programação têm sido usadas desde então. A linguagem inicialmente utilizada foi FORTRAN, que apesar de ser a mais utilizada pelos engenheiros, não era a mais recomendável por ser de difícil programação além de uma complicada solução para os chamados "*bugs*" de programa. Após esta fase inicial, muitas outras linguagens foram sendo usadas como, por exemplo, o Pascal, C, GPSS (General Purpose Simulation System), Visual Basic, etc.

Estes simuladores existentes na bibliografia não satisfazem as necessidades impostas pelo trabalho desenvolvido nesta dissertação, devido às características presentes na lavra da Mina Esperança.

1.2 Motivação para o estudo

Um primeiro motivo para a elaboração deste estudo foi a dificuldade de condução da lavra em um painel na Mina Esperança, que por sua vez implica em uma queda acentuada na produção de carvão diária. A meta diária de produção nem sempre pode ser alcançada, e em certas circunstâncias pode ser muito insatisfatória. Para diminuir este problema, pode ser utilizada uma ferramenta computacional permitindo ao engenheiro de minas adotar possíveis melhorias ou modificações no sistema de produção da mina.

Aliado a isto, um sistema de câmaras e pilares que não possua uma devida ordem de lavra gera uma dificuldade em se manter o painel de lavra alinhado. Isto é, os avanços não são de forma regular em todo o painel, refletindo diretamente na dificuldade de ventilação das galerias e frentes de trabalho. Sabe-se que as condições de ventilação estão ligadas diretamente na produção de minério, pois interfere sobremaneira na condição física do trabalhador, além de prover a diluição dos gases tóxicos gerados pela detonação de explosivos.

As Figuras 1.1 e 1.2 mostram diagramas simples de visualização da configuração do painel de lavra. Na Figura 1.1, pode-se visualizar a distribuição real e inadequada das frentes de lavra em um painel no mês de Agosto de 2002, na Mina Esperança, enquanto a Figura 1.2 representa um modo idealizado de condução da lavra no painel, onde o avanço ocorre de forma alinhada. As áreas demarcadas com "x" significam área não lavrada.

O uso de um programa de computador que possa simular as operações em um painel de lavra de carvão é necessário devido a complexibilidade dos fatores que compõe o ciclo de lavra. A construção do simulador vem tornar este processo de análise mais rápido, ajudando a tomada de decisões. Isto é, analisar o impacto de diferentes ordens de ocupação das frentes de lavra, bem como alguma alteração nos tempos das

atividades desempenhadas por cada equipamento, além da quantidade de equipamentos ideal para a execução dos trabalhos.

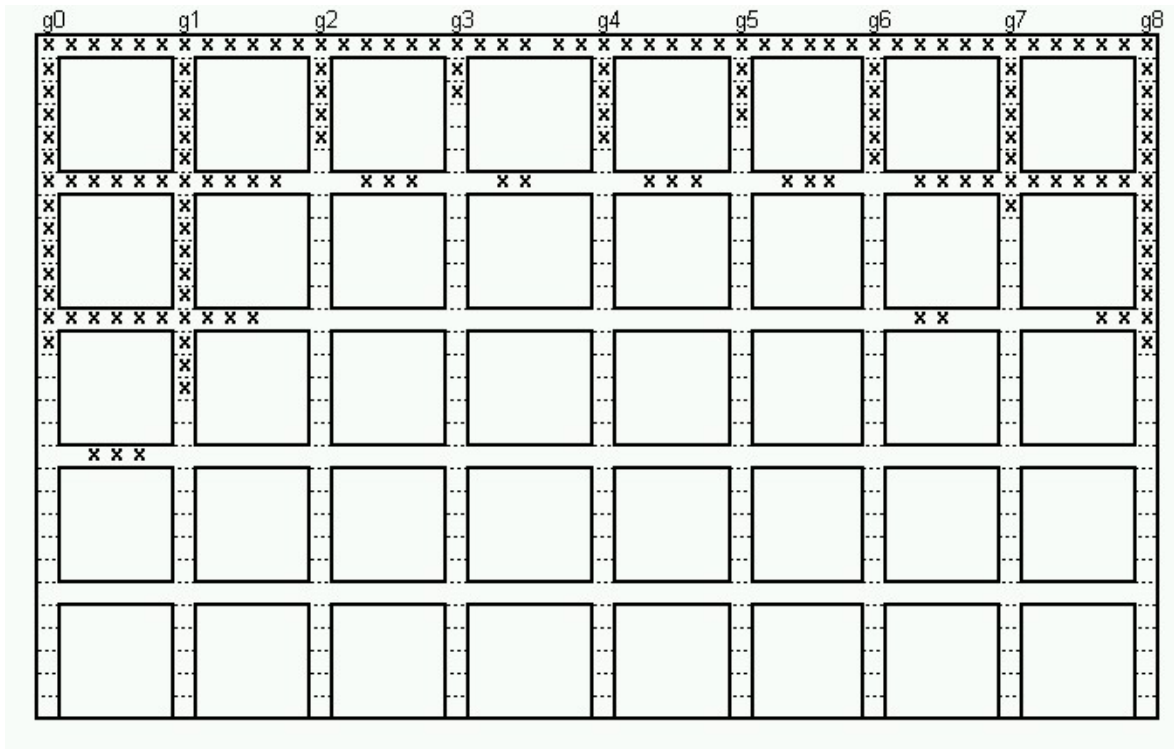


Figura 1.1 Diagrama de localização das frentes de lavra em Agosto de 2002.

* O X indica frente a ser lavrada.

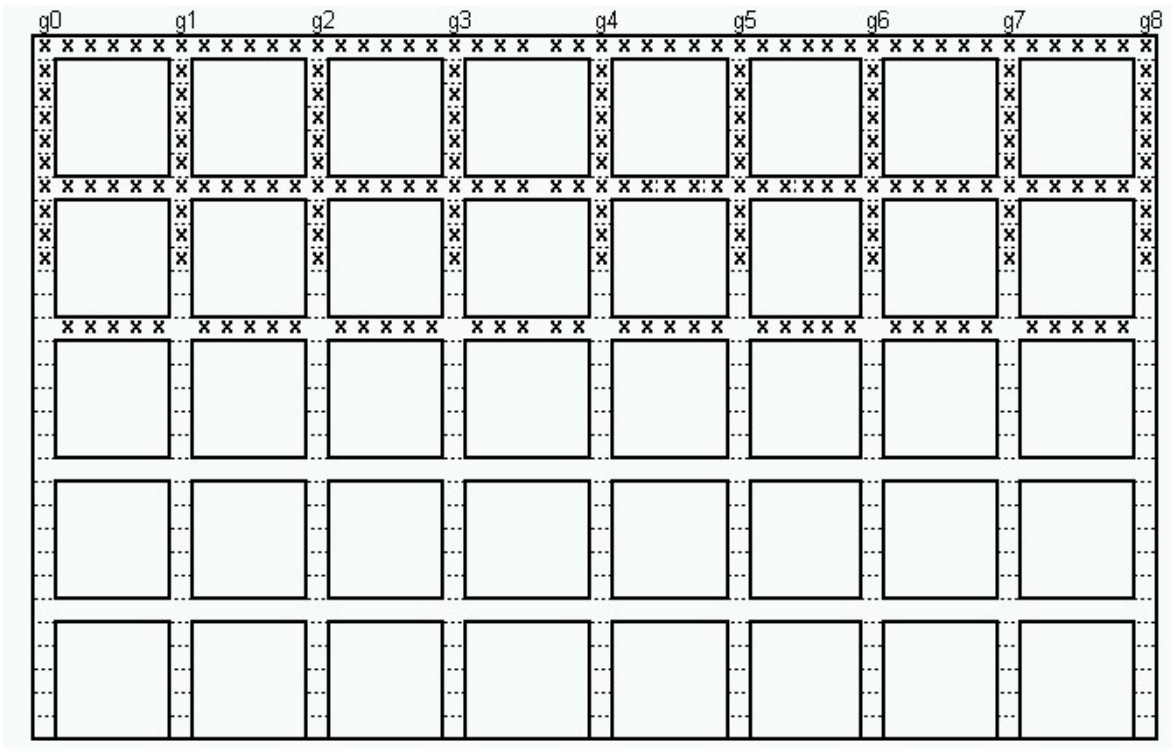


Figura 1.2 Diagrama de localização das frentes de lavra idealizado.

*O X indica frente a ser lavrada.

1.3 Meta

A meta da dissertação é a construção de um modelo de simulação de produção de minério no sistema de câmaras e pilares, bem como utilizá-lo na otimização do uso dos equipamentos nas frentes de trabalho, em conjunto com uma ordenação de lavra.

1.4 Objetivos

A partir da meta proposta, tem-se a necessidade de analisar o sistema de operações unitárias. Para que a meta seja alcançada, os seguintes objetivos particulares ao estudo foram estabelecidos:

- i. Formação de um banco de dados dos tempos de atividades desenvolvidas com cada equipamento ou atividade que compõe o sistema de produção (tempos de atividades, tempos de esperas, etc);
- ii. Desenvolvimento de um programa computacional, simulando o sistema de produção;
- iii. Avaliação do impacto de possíveis mudanças nas operações do painel de lavra.

1.5 Contribuições do trabalho

O trabalho visa elaborar um simulador de produção para minas de carvão, que poderão utilizar essa técnica para avaliação de seus sistemas, particularmente na região sul do Brasil, e poderá implicar em:

- i. Redução de custos operacionais;
- ii. Maior utilização dos equipamentos;
- iii. Auxílio ao planejamento de lavra.

1.6 Metodologia

A metodologia aplicada a este trabalho visa conduzir o estudo de uma forma clara e objetiva. Para isto, o trabalho foi dividido em etapas primordiais:

- i. Revisão bibliográfica na área de simulação de lavra possibilitando um embasamento teórico para a condução do estudo;

- ii. Acompanhamento das atividades realizadas no painel de lavra e formação de um banco de dados dos tempos das operações;
- iii. Construção e validação de um simulador computacional;
- iv. Aplicação do simulador na análise de alternativas ao esquema vigente de operação;
- vi. Análise dos resultados.

1.7 Estrutura da dissertação

O capítulo dois conta com a base teórica necessária para o desenvolvimento do estudo de simulação com o uso de técnicas computacionais. O capítulo três apresenta o sistema câmaras e pilares, descreve os equipamentos de lavra e apresenta os problemas encontrados, além de apresentar o banco de dados coletado. O capítulo quatro apresenta o sistema computacional utilizado, suas funções e a sua validação. No capítulo cinco, se apresentará um exemplo do uso do simulador computacional. As conclusões finais darão encerramento ao trabalho no capítulo seis.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Introdução

Este capítulo traz uma revisão dos conceitos gerais mais importantes na simulação, com vistas a uma correta avaliação do sistema estudado e a validade de sua aplicação. Contém alguns exemplos de aplicações, tanto em mineração subterrânea bem como a céu aberto. Também, os modelos de simulação e ferramentas mais comumente utilizados em mineração são apresentados.

2.2 Introdução à simulação

Segundo Miyagi (2002), simulação é, em geral, entendida como uma imitação de uma operação ou de um processo real. Independente do uso de computadores, a simulação envolve a geração de uma "história artificial" de um sistema para a análise de suas características.

O comportamento de um sistema é estudado com um modelo a ser simulado. Este modelo utiliza diversos parâmetros sobre a operação do sistema. Uma vez desenvolvido e validado, o modelo pode ser usado para investigar uma grande variedade de questões. Mudanças no sistema podem ser simuladas a fim de prever o impacto no seu desempenho. A simulação também pode ser usada para estudar sistemas ainda em fase inicial de

estudo, antes que efetivamente sejam implementados. Assim, a simulação pode ser usada como uma ferramenta para investigar os efeitos de uma mudança em sistemas existentes bem como uma ferramenta de projeto para avaliar e validar o desempenho de novos sistemas.

Muitos sistemas reais são complexos e modelos matemáticos ficam impossíveis de serem adequadamente desenvolvidos. Neste caso, utilizam-se técnicas de simulação computadorizadas para reproduzir o comportamento do sistema num certo intervalo de tempo. A partir desta simulação, os dados são coletados como se um sistema real estivesse sendo observado. Estes dados serão então usados para estimar as medidas de desempenho do sistema.

2.3 Os objetivos da simulação

A maior disponibilidade de ferramentas de simulação, a crescente capacidade computacional juntamente com os avanços nas metodologias de simulação fizeram da simulação umas das técnicas mais usadas de análise e desenvolvimento de sistemas.

A simulação pode ser usada principalmente para as seguintes finalidades:

- i. Estudar as interações internas de um sistema.
- ii. Realizar alterações nas informações, na organização e no ambiente do sistema para observar seus efeitos.
- iii. Adquirir maior conhecimento sobre o processo de desenvolvimento do modelo visando melhoria para o sistema.

- iv. Identificar as variáveis mais importantes do sistema e a interação entre elas.

2.4 As vantagens e desvantagens da simulação

A simulação é vantajosa quando ela reproduz com menor custo ou menos recursos o que acontece num sistema real. Conforme Myiagi (2002), os dados de saída de uma simulação devem corresponder diretamente às saídas que seriam obtidas do sistema real. Dado um conjunto particular de entradas o modelo é executado e o comportamento do sistema é estudado. Este processo de alteração de variáveis do modelo resulta em um conjunto de cenários a serem avaliados.

2.4.1 Vantagens da simulação:

As principais vantagens da simulação compreendem:

- i. Novas políticas, procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxos de informação, podem ser estudados sem interferência nas operações do sistema real.
- ii. Novos equipamentos, arranjos físicos, sistemas de transporte, podem ser testados antes de se investir recursos com as aquisições envolvidas.
- iii. O tempo pode ser comprimido ou expandido, permitindo que o fenômeno em estudo possa ser acelerado ou retardado.
- iv. Critérios sobre o papel das variáveis podem ser identificados.

- v. "Gargalos" onde os processos, informações ou materiais tem seus fluxos comprometidos podem ser identificados.
- vi. Pode-se conhecer melhor como o sistema opera ao invés de se basear apenas em suposições de como ele funciona.
- vii. Perguntas do tipo "E se....?" podem ser respondidas.

2.4.2 Desvantagens da simulação:

As desvantagens principais são:

- i. A construção dos modelos requer um treinamento especial, pois envolve o bom uso da experiência. Se dois modelos forem construídos por duas pessoas diferentes, estes poderão ser similares, porém raramente iguais.
- ii. Os resultados podem ser difíceis de se interpretar, pois devidos às entradas aleatórias, os resultados podem ser fruto das inter-relações efetivas do sistema ou da própria aleatoriedade do sistema.

2.5 Análise de sistemas

O modelo de simulação no método câmaras e pilares, para otimização de produção pode requerer uma detalhada análise dos processos de mineração e da maneira com a qual as variáveis interagem e afetam os equipamentos (Farmer, 1990). As variáveis podem ser a altura da camada, qualidade do piso, qualidade do teto, quantidade de metano, dureza do

carvão, profundidade da mina, presença de água, etc. Por exemplo, em um ciclo típico, o corte e o minerador contínuo podem ser afetados pela espessura da camada, resistência do carvão, entre outros fatores. A perfuração pode ser afetada pela dureza da rocha e o desmonte pela quantidade ou profundidade dos furos. O escoramento do teto será afetado pela dureza das rochas do teto e a ventilação pela quantidade de metano ou de gases de combustão. Apenas o transporte e carregamento estão diretamente ligados ao *lay-out* e *design* da mina.

Os estudos de tempos e simulações de minas que utilizam o método câmaras e pilares indicam que a perda de tempo pode representar cerca de 15 a 25 % do tempo disponível de produção. Estes tempos podem ser o transporte de pessoal, lanche, quebras, serviços de manutenção, etc. Em minerações americanas, geralmente o tempo disponível para a produção varia de 175 a 300 min por turno, com um valor médio em torno de 225 minutos.

2.5.1 Modelos na análise de sistemas

Salvadoretti (1998), diz que modelos de simulação são umas das mais poderosas e versáteis ferramentas para prever o desempenho de operações na mineração. Modelos que envolvem como dados de entrada variáveis randômicas são freqüentemente usados. Os engenheiros de minas, particularmente utilizam sistemas com variáveis randômicas para resolver vários problemas mineiros, entre eles a:

- i. Influência de quebras no tamanho de uma frota de caminhões.
- ii. Influência dos diferentes tamanhos e velocidades de esteiras quanto ao material derramado próximo aos pontos de transferência.

- iii. Influência da aleatoriedade dos tempos de carregamento e transporte no ciclo total de caminhões em uma frota que utiliza o sistema de despacho.

Se as variáveis de entrada são randômicas, o resultado do processo também é randômico. O objetivo é conhecer a distribuição de probabilidade para a variável final como função das variáveis de entrada. O resultado final de uma simulação é um valor único, por exemplo, a produção final de minério em um turno ou dia de trabalho. A função de probabilidade para variável de saída só é conhecida depois de algumas realizações feitas.

Uma primeira análise a se fazer é estabelecer a performance da variável de interesse. Por exemplo, no sistema caminhão-escavadeira as variáveis a serem analisadas podem ser o ciclo total médio dos caminhões, tempos de espera dos caminhões para serem carregados, tempo de espera da escavadeira por caminhões, etc.

2.6 Sistemas discretos e contínuos

Segundo Miyagi (2002), um sistema é definido como um grupo de objetos que estão agregados de acordo com uma relação de interdependência para atingir certos objetivos. Os sistemas podem ser classificados com discretos ou contínuos.

2.6.1 Sistemas discretos

Num sistema discreto, o estado das variáveis é discreto e é alternado somente em instantes específicos. Um gráfico dos valores variáveis pelo

tempo aparece como uma função “salto”. Um exemplo é o sistema de transporte por caminhão, o qual pode ser modelado como um sistema de eventos discretos. A chegada de um caminhão para ser carregado pode mudar o status de uma carregadeira, onde ela passa de ociosa a ocupada, ou até mesmo uma quebra de equipamento. A Figura 2.1 mostra a forma de um evento discreto, mostrando a condição de “comprimento da fila” e “status da carregadeira” versus tempo.

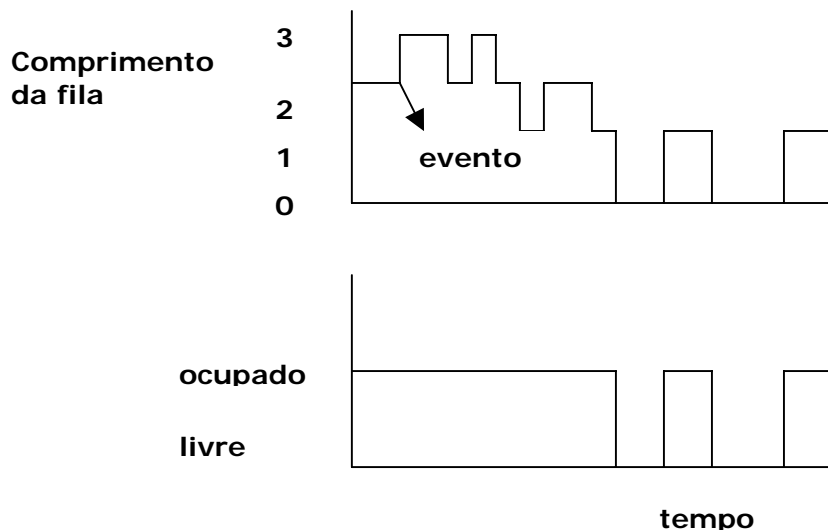


Figura 2.1 Estado das variáveis vs. tempo para um modelo de evento discreto, adaptada de Yingling, 1992, SME.

2.6.2 Sistemas contínuos

No sistema contínuo, o estado das variáveis é alterado continuamente ao longo do tempo. Um exemplo para este sistema seria o enchimento de uma barragem de drenagem ou bacia de decantação de mina (Figura 2.2) onde o nível é alterado continuamente, implicando, por exemplo, na capacidade de bombeamento.

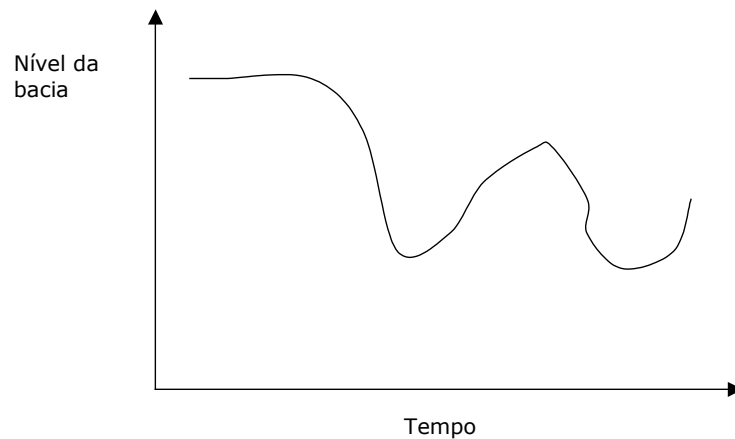


Figura 2.2 Exemplo de uma variável contínua.

2.7 Modelo de um sistema

Um modelo pode ser definido como a representação de um sistema com o intuito de estudá-lo. Na maioria dos casos, é necessário somente considerar os aspectos do sistema que realmente serão estudados. A simplificação do sistema é necessária para a economia no tempo de programação do modelo, porém, as características principais devem ser mantidas, a fim de não descaracterizar o sistema em questão.

2.7.1 Tipos de modelos

Os modelos de simulação podem ser determinísticos ou estocásticos e, discretos ou contínuos:

2.7.1.1 Modelos determinísticos

Modelos que não tem variáveis aleatórias são classificados como determinísticos. Estes modelos têm um conjunto de entradas conhecidas, as quais resultarão em um único conjunto de saídas. Este caso pode ser exemplificado pelo tempo de viagem de um caminhão sob certa condição, onde a velocidade deve ser mantida constante, na marcha recomendada pelo fabricante para uma dada condição de pavimento.

2.7.1.2 Modelos estocásticos

Um modelo estocástico possui uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, o que levam a saídas aleatórias. Assim, as saídas da simulação estocástica devem ser tratadas como estimativas estatísticas das características reais do sistema. Os dados de entrada são caracterizados por algum tipo de função de distribuição de probabilidade, por exemplo, dados coletados de tempos de basculamento de um caminhão. As distribuições de entrada são conhecidas pela sua forma (e.g., normal, exponencial, gamma) e seus parâmetros. A Figura 2.3 mostra a entrada de dados de forma estocástica e a saída dos resultados igualmente sendo tratada estocasticamente para o caso de transporte por caminhão.

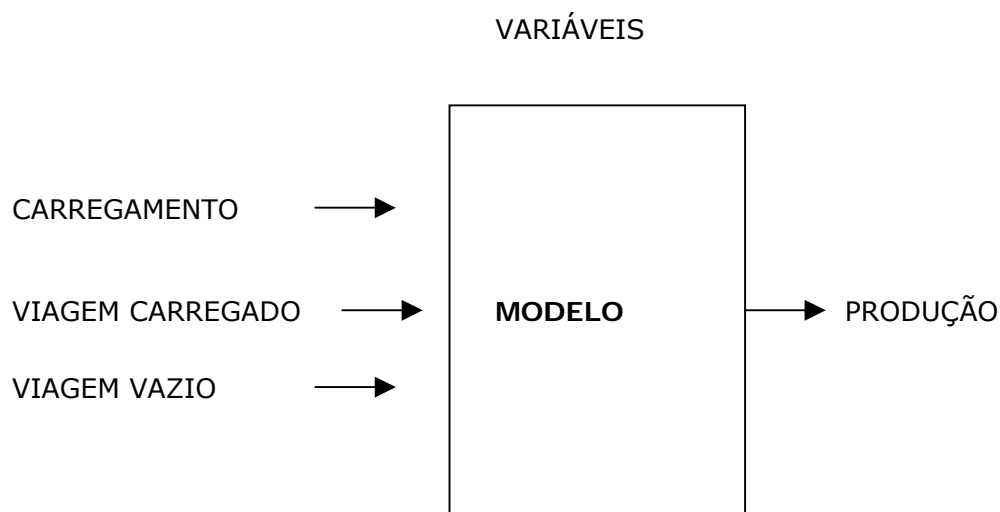


Figura 2.3 Saída de um modelo estocástico de um sistema produção, adaptada de Yingling, 1992, SME.

2.7.1.3 Modelos discretos e contínuos

Os modelos discretos e contínuos são definidos com as mesmas considerações que definem se um sistema é discreto ou contínuo. Segundo Buffa e Dyer (1977), citado por Gavira (2003), modelos de simulação de sistemas são usualmente do tipo discreto e são freqüentemente uma combinação de processo determinísticos e estocásticos, especialmente quando o sistema é muito complexo.

2.7.1.4 Modelo híbrido

Existem ainda os modelos híbridos de simulação que fazem uso de mais de uma técnica. Segundo Gignac (1981), modelos híbridos são os modelos que usam as técnicas determinísticas e estocásticas, onde os eventos determinísticos e estocásticos acontecem simultaneamente. Tem-se

por exemplo, um simulador para o sistema caminhão-escavadeira onde a performance dos caminhões pode ser obtida deterministicamente com base nas características mecânicas, enquanto os tempos das atividades da carregadeira são obtidas por distribuições de probabilidade.

As técnicas de simulação citadas acima têm sido amplamente aplicadas em sistemas de produção de mina para uma análise detalhada da interação entre equipamentos e suas produtividades. Dentre muitas razões para a aplicação, a mais importante é que elas podem lidar muito bem com as características dinâmicas e estocásticas do sistema, também incorporar um grande número de detalhes de operação no modelo a ser simulado.

2.8 Simulação de eventos discretos

Os benefícios do uso da simulação são potencialmente maiores quando a operação não pode ser estudada diretamente porque ela não existe, não está disponível, ou no caso em que trabalhar com ela diretamente seria economicamente muito dispendioso (Salvadoretti, 1998). Além disto, pode haver a possibilidade de que a mudança a ser implementada seja de difícil execução, considerando-se a chance de incerteza de acertos. A simulação de sistemas a eventos discretos é própria para a análise de sistemas no qual o estado discreto das variáveis muda apenas com a ocorrência e eventos instantâneos. Os modelos de simulação são analisados por métodos numéricos ao invés de analíticos.

Os métodos analíticos empregam o raciocínio dedutivo ou matemático para resolver um modelo. Métodos numéricos empregam procedimentos computacionais para resolver modelos matemáticos. No caso de modelos de simulação que empregam métodos numéricos, modelos com as mesmas características físicas e estruturais reais dos mesmos são executados ao

invés de resolvidos, isto é, uma história artificial do sistema é gerada baseada nas suposições que são assumidas para o modelo proposto. Resultados e observações são colhidos para serem analisados e estimados para medir o desempenho do sistema real.

Os métodos matemáticos são desenvolvidos visando obter as variáveis que realmente influenciam o modelo e suas relações, formulando-se a partir daí uma relação matemática (equação) que descreva o sistema e que possibilite prever diferentes situações do mesmo. Como os modelos de simulação a serem desenvolvidos são relativamente complexos, e a quantidade de informações manipuladas é muito grande, utilizam-se computadores para executar a simulação.

2.8.1 Exemplos do uso da simulação de eventos discretos em mineração

A simulação de eventos discretos é a mais usada no meio da mineração. Tanto em mineração subterrânea quanto a céu aberto, a simulação é um dos meios mais eficazes e atuais de se prever modificações em sistemas existentes ou novos sistemas a serem implementados.

Gignac (1981) desenvolveu um modelo de simulação híbrido que usa o método determinístico e estocástico para o transporte de minério. O modelo visou o transporte no sistema *sub-level stoping* levando em conta não somente os atrasos na fila do carregamento e descarregamento, mas também a interferência do tráfego. Os atrasos são registrados pelo simulador para dar uma melhor idéia da produtividade de cada unidade adicional de transporte implementada. O módulo determinístico do simulador é usado para acelerar e desacelerar o veículo a uma certa condição de pavimento, características mecânicas, etc. Todos os tempos das

outras atividades são obtidos por números randômicos sob uma dada distribuição de probabilidade previamente estabelecida.

Sturgul (2000) elaborou um simulador pra o transporte de superfície de materiais por meio de trens. O modelo desenvolvido simula algumas situações como horas trabalhadas por dia para cada unidade, número de carros no sistema, tempo de carregamento e descarregamento. Basicamente todas as variáveis do sistema são geradas estocasticamente por meio da linguagem GPSS/H. Os dados de saída contêm distribuições estatísticas para cada um dos elementos do sistema (carregamento, transporte, quebras, etc).

Um simulador para as atividades de uma *dragline* foi desenvolvido por Mirabediny & Baafi (1998). Usando-se um monitor de coleta de dados foram obtidos cerca de 100.000 ciclos para dois tipos diferentes de operação. Todas as operações da dragline foram coletadas e ajustadas as funções de probabilidade que foram usadas no simulador. Os dados foram modelados pelo software ARENA.

Esperando aumentar a produção de minério de uma certa mina, Hollberg, et al. (2002) desenvolveram um simulador que incluía a adição de uma pilha na superfície, de mais pessoal, mudança de turnos, etc. O modelo desenvolvido inclui *shuttle cars*, mineradores contínuos, correias alimentadoras, britadores, etc. Cada um destes equipamentos tem suas disponibilidades mecânicas geradas estocasticamente, servindo como base de entrada no momento da simulação. A programação foi feita em GPSS/H.

2.9 Procedimentos para uma simulação

Segundo Miyagi (2002), os procedimentos para uma simulação compreendem as etapas observadas na Figura 2.4.

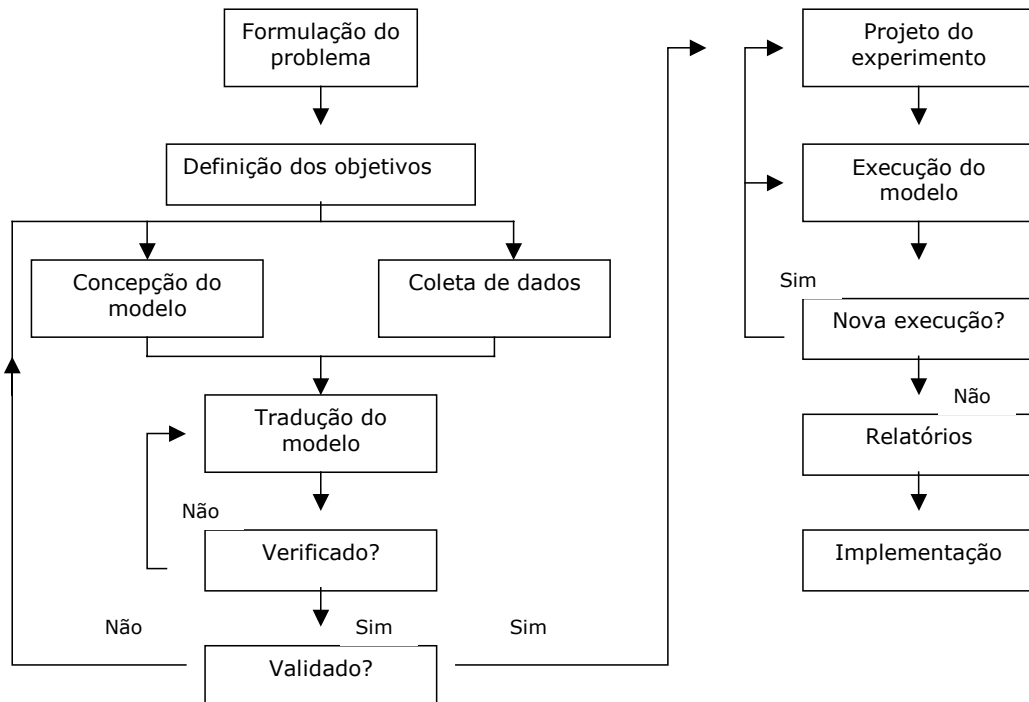


Figura 2.4 Passos para implementação de um processo de simulação

Brunner (2001), sugere em seu trabalho os seguintes passos em um projeto de simulação:

- i. Definir os objetivos do projeto;
- ii. Definir o escopo do projeto e o nível de detalhamento a ser usado na simulação para alcance dos objetivos;
- iii. Planejar o projeto;
- iv. Formular o modelo. Planejamento dos componentes do sistema, desenvolver os requerimentos dos dados de entrada;

- v. Coleta de dados, não apenas físicos (velocidades, tempos), mas também lógicos (organização do sistema);
- vi. Construção do modelo;
- vii. Verificação do modelo, necessário para aferição do modelo final, podendo ser passo a passo durante a construção do modelo ou final, já com o modelo finalizado;
- viii. Validação do modelo. Consiste no processo de constatação da representatividade do modelo em relação ao sistema real simulado;
- ix. Simulação do experimento. Põe em prática o modelo desenvolvido e serve, também, como parâmetro de validação do modelo, o qual pode ser reajustado;
- x. Preparação e entrega da apresentação, ou documentação final;
- xi. Implementação das recomendações do projeto.

2.10 A linguagem Visual Basic

No desenvolvimento do simulador, foi utilizada a linguagem do Visual Basic[®] 6.3 disponível no Microsoft Excel[®]. Visual Basic[®] é uma linguagem de programação destinada à criação de aplicativos para o Microsoft Windows, oferecendo um conjunto de ferramentas para simplificar o desenvolvimento de aplicativos. Antes do Visual Basic[®], todas as linguagens de programação eram parecidas do ponto de vista conceitual. Com o passar do tempo, escrever programas passou a ser cada vez mais difícil. Entretanto, alguns programadores perceberam que coisas difíceis de serem feitas, como

construir janelas, menus ou botões, eram sempre repetidas. Assim se colecionou sub-rotinas de utilização geral, passando a dar origem ao Visual Basic.

O Visual Basic® criou assim uma interface gráfica para o usuário. Não é preciso escrever extensos comandos de programação, os objetos são desenhados na tela de forma visual, com auxílio do mouse. O nome "Basic" refere-se à linguagem BASIC (Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code), a linguagem mais usada por programadores na história da computação. O Visual Basic® evoluiu da linguagem BASIC original, e agora contém várias centenas de instruções, funções e palavras-chave.

Segundo o anúncio da Microsoft, a versão 5.0 do sistema de desenvolvimento Visual Basic® bateu o recorde com mais de um milhão de licenças vendidas desde sua introdução no mercado, em março de 1997. O produto é líder também em uso no campo acadêmico, assim como nas categorias de desenvolvimento de aplicações para Web e servidores. As vendas da versão 5.0 do Visual Basic são 40% maiores do que foram as vendas de licenças do Visual Basic® 4.0 em seus primeiros 10 meses, com um aumento de 126% apenas na área acadêmica.

Segundo Anon. (1993), citado por Salvadorette, o Visual Basic possui as seguintes importantes características:

- i. Portabilidade do programa, permitindo simulações em computadores compatíveis com o IBM-PC/486 ou superior;
- ii. Execução em ambiente Windows, que é de uso comum em computadores e permite fácil integração com outros aplicativos;

- iii. Construção de uma interface cômoda para o desenvolvimento dos modelos de simulação, normalmente uma tarefa demorada nesta classe de simuladores;

Por fim, o Visual Basic devido à sua facilidade e amigabilidade de programação, onde usuários não experientes têm a possibilidade de resolver problemas rapidamente, demonstrou ser o programa computacional mais apropriado e que satisfaz as condições exigidas pelo trabalho a ser desenvolvido.

2.11 Intervalo de confiança para a medida da diferença de performance de dois sistemas

Uma maneira de se comparar dados em grupos diferentes é por meio da análise descrita por Law e Kelton (1991). A análise proposta é utilizada quando se deseja inferir se duas populações diferem ou não entre si, para um dado nível de significância. Assim, tal método pode vir a ajudar na tomada de decisão quanto à similaridade ou não das simulações.

Consideremos um caso especial de comparação de dois sistemas como base de medida de performance. A comparação é realizada tendo-se um intervalo de confiança para a diferença dos dois sistemas, fazendo-se um teste de hipótese para ver o quanto à diferença observada é significativamente diferente de zero. O intervalo de confiança nos dá esta informação (o intervalo contém ou não o zero), assim pode-se concluir se os dois sistemas diferem ou não.

Para $i = 1, 2, \dots$, temos $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$, são as observações para o sistema i e $\mu_i = E(x_{ij})$. Se deseja construir um intervalo de confiança para $\zeta = \mu_1 - \mu_2$.

Se $n_1 = n_2$ ou excluindo alguns dados para que o sistema tenha as mesmas n observações, nós podemos parear x_{1j} com x_{2j} para definir $Z_j = x_{1j} - x_{2j}$. Para $j = 1, 2, \dots, n$. Assim os Z_j 's são as variáveis e $E(Z_j) = \zeta$

$$z(n) = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} \quad (2.1)$$

$$Var[z(n)] = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - z(n)]^2}{n(n-1)} \quad (2.2)$$

$$z(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{Var[z(n)]} \quad (2.3)$$

Onde $z(n)$ é o z médio.

Se Z_j 's são normalmente distribuídos, este intervalo de confiança é exato, assim ζ tem probabilidade $1 - \alpha$.

Para este caso é importante dizer que x_{1j} e x_{2j} não necessitam ser independentes e que as variâncias $Var(x_{1j})$ e $Var(x_{2j})$ não precisam ser iguais, se adequando perfeitamente ao sistema estudado. O intervalo de confiança é chamado de "intervalo de confiança t-pareado".

A seguir, no capítulo três serão apresentados os equipamentos utilizados na Mina Esperança, os dados de campo coletados para cada operação bem como uma visão geral do sistema câmaras e pilares.

CAPÍTULO 3 – O CONJUNTO MECANIZADO E BANCO DE DADOS

3.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se o método de mineração tradicional câmaras e pilares para lavra de carvão, os equipamentos utilizados e os aspectos importantes sobre o ponto de vista operacional, apontando os problemas enfrentados. Por fim, apresenta-se o banco de dados coletado dos tempos de operação para os diversos equipamentos estudados.

3.2 Localização

A Mina Esperança, pertencente à Carbonífera Metropolitana S.A., está em operação desde 1984 e localiza-se no município de Treviso, Santa Catarina, distante aproximadamente 30 km de Criciúma (Figura 3.1).

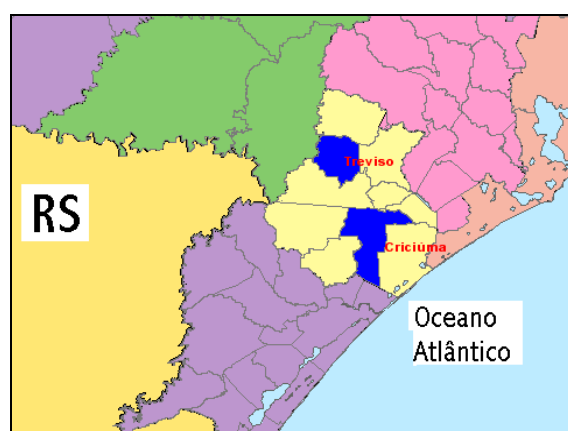


Figura 3.1 Localização geral da cidade de Treviso.

3.3 O sistema câmaras e pilares.

O método de câmaras e pilares é um método de lavra usado em depósitos horizontais ou com pequena inclinação de camada, em rocha competente, onde o teto é suportado primariamente por pilares. O minério é extraído em salões de formas retangulares e em galerias, deixando partes de minério entre as galerias como pilares para que haja a sustentação do teto. Para simplificar a operação, a disposição dos pilares se dá regularmente, sendo de forma quadrada ou retangular. A dimensão das galerias e pilares depende de muitos fatores, entre os quais:

- i. resistência dos pilares;
- ii. espessura da camada;
- iii. profundidade do depósito;
- iv. tipo de equipamento de lavra a ser utilizado.

O objetivo do método é extrair a maior quantidade de minério compatível com as condições de segurança de trabalho. A unidade básica de produção em uma mina de carvão é o painel, que define a área da mina a ser trabalhada e ventilada. No painel, podem existir duas fases de lavra:

- i. Avanço da lavra no painel tendo os pilares como suporte principal;
- ii. Lavra em recuo, onde parte dos pilares é novamente minerada, aumentando o índice de extração.

A legislação brasileira, no entanto, não permite a lavra em recuo por motivos de segurança tanto dos operários como por prevenção de movimentos de subsidência do solo.

3.4 Métodos de produção

Existem dois tipos básicos de produção em uma mina que usa o método câmaras e pilares. Um deles é o método tradicional, onde se têm todas as operações unitárias bem definidas, sendo elas:

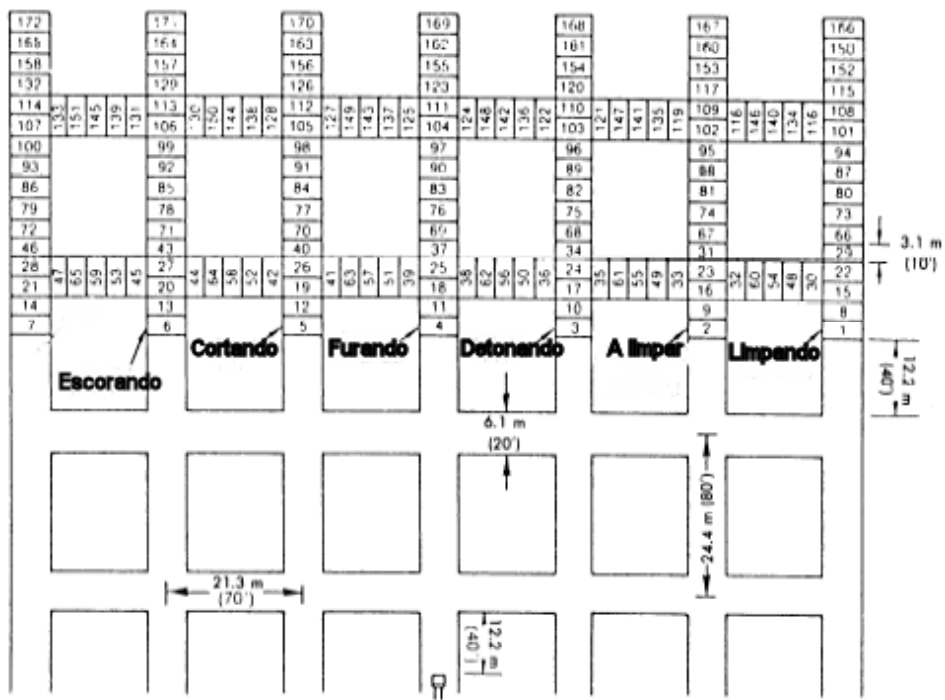
- i. Escoramento do teto;
- ii. Corte da camada de carvão;
- iii. Furação de frente;
- iv. Preparação da frente e detonação;
- v. Limpeza da frente de lavra;

Cabe ressaltar que em minerações de carvão subterrânea no Brasil, particularmente no estado de Santa Catarina, apenas a Mina Esperança utiliza a etapa de corte da camada de carvão. Nas outras minerações da região, tal etapa não é utilizada.

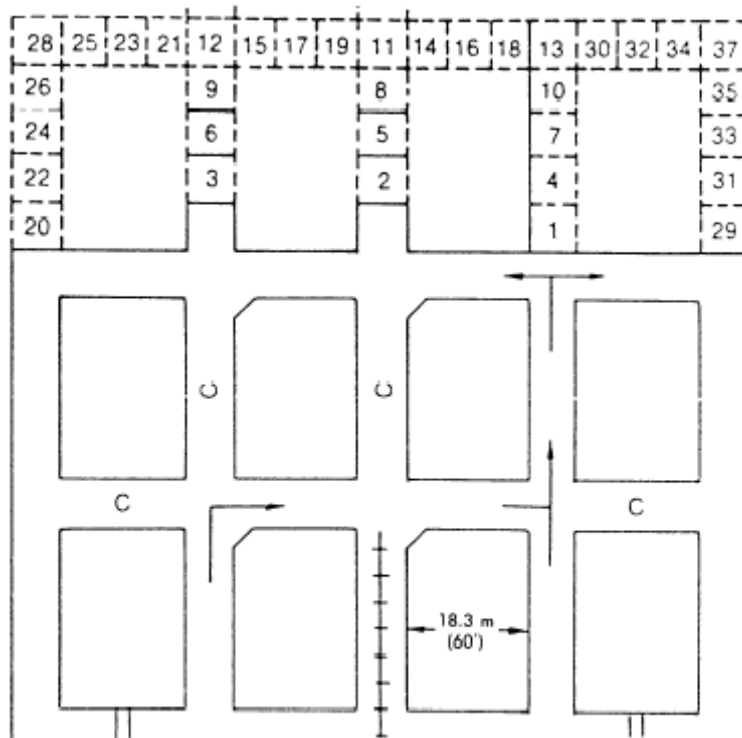
O outro método é o chamado lavra com minerador contínuo, onde as etapas que compõe o ciclo operacional são:

- i. Escoramento do teto;
- ii. Desmonte mecânico e limpeza da frente.

A vantagem do método contínuo é a eliminação de algumas operações unitárias (corte, furação e detonação), dando agilidade ao processo, exigindo um número menor de frentes de lavra a serem trabalhadas continuamente. A Figura 3.2 (a) mostra um painel convencional com seis pilares, sete galerias. Na Figura 3.2 (b) tem-se um painel de quatro pilares, cinco galerias para lava contínua.



(a)



(b)

Figura 3.2 Painel convencional de lavra (a) e painel para Lavra contínua (b), adaptada de Farmer, 1992, SME.

Os dois tipos básicos de ciclos produtivos em mineração pelo método de câmaras e pilares são ilustrados pela Figura 3.3. Para corpos de minério em rocha dura, a Figura 3.3 (a) representa as etapas necessárias para a extração do minério, excetuando-se a etapa de corte, que é exclusiva para mineração de carvão. A Figura 3.3 (b) ilustra as etapas para a extração de minério pelo método contínuo.

Há uma considerável complexibilidade em organizar estas operações considerando-se que cada equipamento tem o seu caminho a percorrer. Para estimar os ciclos para cada equipamento, é necessário determinar as várias operações realizadas e seus respectivos tempos. A análise de outros elementos como a ventilação e itinerário dos equipamentos durante a lavra também são fatores importantes no estudo.

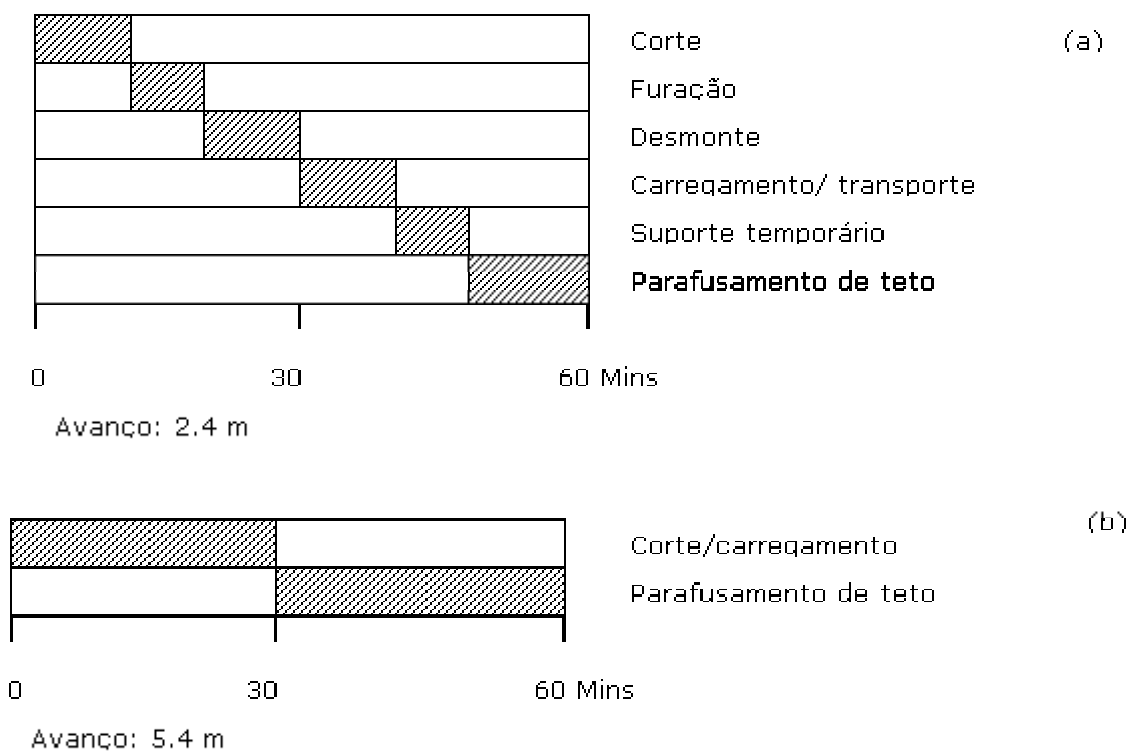


Figura 3.3 Ciclos produtivos para lavra convencional (a) e lavra contínua (b), adaptada de Farmer, 1992, SME.

3.5 Ciclo produtivo em um painel de lavra típico com uso de conjunto mecanizado

O ciclo de produção inicia no escoramento do teto logo após a limpeza da frente de lavra. Escorado o teto, a próxima etapa utiliza a cortadeira para a abertura de uma face livre horizontal a alguns centímetros do piso visando facilitar o desmonte. Feito o corte, a perfuratriz de frente prepara a frente de lavra para a colocação dos explosivos. Após a frente é carregada e detonada, e o minério é carregado para o *shuttle car* por meio de um *loader*. O *shuttle car* carregado transporta o minério até o alimentador da correia transportadora, levando o minério para a superfície. A Figura 3.4 mostra uma seqüência de trabalho:

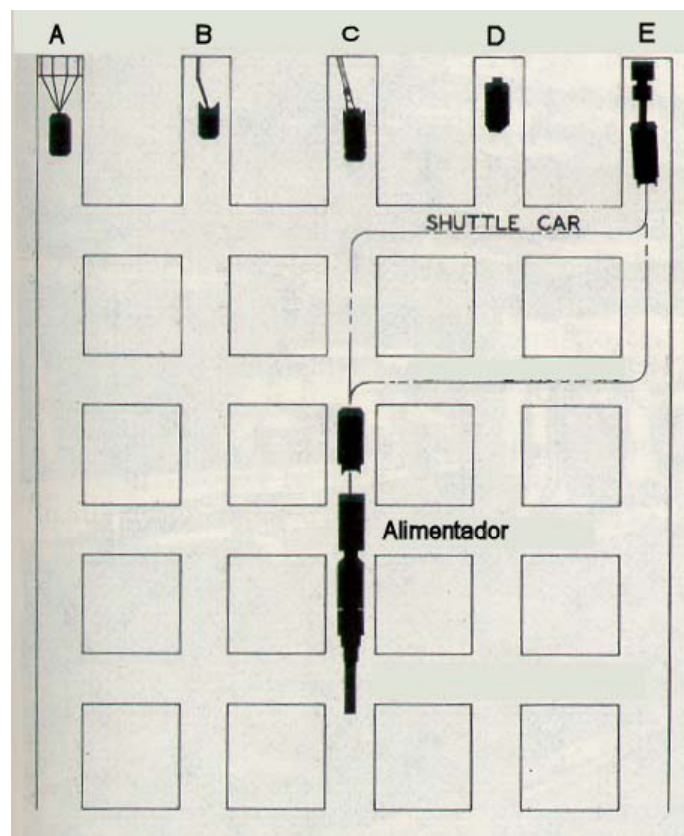


Figura 3.4 Representação esquemática da seqüência de trabalho, Cummings & Given, 1973, SME. A: Detonação, B: Furação, C: Corte, D: Parafusamento, E: Carregamento e transporte.

3.6 Características do painel de lavra estudado

O painel de lavra utilizado para fazer a coleta dos ciclos de equipamentos na Mina Esperança foi o painel CM 5 (Conjunto Mecanizado 5), Figura 3.5. A lavra é feita usando-se pilares quadrados de 16 m de lado e 9 galerias de 6 m de largura. A altura da galeria é de 2,10 metros. Possui em geral 16 homens envolvidos em:

- i. Escoramento de teto – 4 homens;
- ii. Corte da camada – 2 homens;
- iii. Perfuração de frente – 1 homem;
- iv. Carregamento com explosivos – 1 homem;
- v. Limpeza da frente - 5 homens;
- vi. Eletricista – 1 homem;
- vii. Mecânico – 1 homem;
- viii. Supervisão de turno – 1 homem.

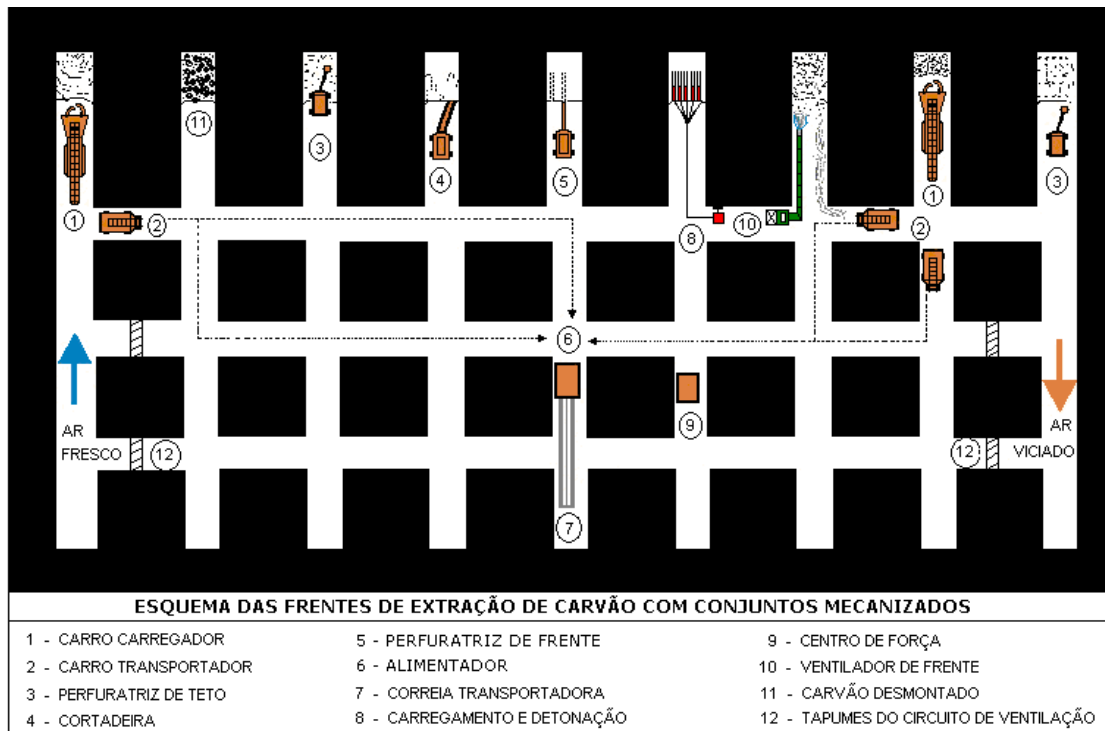


Figura 3.5 Representação esquemática da seqüência de trabalho e painel de lavra. (Kurcewicz, 2004).

3.7 Distribuição das tarefas no ciclo operacional

O escoramento de teto conta com dois homens, um no comando da parafusadora de teto e outro no auxílio para a colocação dos parafusos e talas. A etapa de corte utiliza igualmente dois homens, um no comando do equipamento e outro para dar auxílio no recolhimento de cabos elétricos e mangueiras d'água. A perfuração de frente conta com um operário capaz de suprir todas as necessidades desta etapa. O carregamento das frentes com explosivos é feito por um homem apenas, que se encarrega de transportar o explosivo e prepará-los para o desmonte. Tanto o *loader* quanto o *shuttle car* contam com um operário cada um. A disposição do sistema *loader/shuttle car* pode ser formada por dois *shuttle cars* e um *loader* para galerias mais distantes do alimentador ou um *shuttle car* e um *loader* para galerias mais próximas ao alimentador. Os conjuntos via de regra estão sempre dispostos em lados diferentes do painel, ou seja, um conjunto

loader/shuttle car do lado direito da correia e o outro do lado esquerdo, dividindo o painel em duas zonas, evitando assim um tráfego muito grande nas galerias.

3.8 Conjunto Mecanizado

O Conjunto Mecanizado utilizado nos trabalhos de lavra tem como componentes os seguintes equipamentos:

- i. Parafusadora de Teto ;
- ii. Cortadeira;
- iii. Perfuratriz de Frente;
- iv. *Loader*;
- v. *Shuttle car*;
- vi. Alimentador.

3.8.1 Parafusadora de teto

A Parafusadora de Teto (Figura 3.6) é um equipamento eletro-hidráulico acionado por um motor elétrico de 75 C.V. que por sua vez movimenta duas bombas hidráulicas que permitem a furação com rotação pura e rotação percussiva, de acordo com o tipo de teto encontrado em uma galeria. A furação com impacto é feita normalmente em arenitos com martelo hidráulico marca Copco, modelo COP 1028 de 3.000 b.p.m. enquanto a rotação pura é utilizada para furar materiais menos resistentes, como por exemplo, siltitos.



Figura 3.6 Parafusadora de teto.

O suporte do teto é necessário por dois motivos básicos:

- i. Proteção dos operários e equipamentos quanto à caída do teto;
- iii. Manter as galerias livres de caimentos pelo tempo necessário, que varia desde algumas horas até anos, como no caso de acessos principais ou rotas de ventilação.

Estes dois motivos têm um objetivo básico de não parar a produção de carvão, implicando diretamente em perdas econômicas.

A instalação dos parafusos de teto é feita com motor hidráulico, que também efetua o torque nestes parafusos, em função do seu diâmetro. As máquinas são também dotadas de bomba d'água para aumentar a eficiência da limpeza do furo e ainda uma unidade compressora de ar para garantir a lubrificação do COP 1028 na furação com impacto.

O trabalho da perfuratriz de teto consiste em fazer a perfuração do teto, colocação de parafusos curtos, misturar a resina por meio da rotação do parafuso, esperar para a pega da resina e prover o torque no parafuso. Esta operação é repetida igualmente na colocação de parafusos longos. O projeto prevê colocação de 20 parafusos curtos de 1,10 m e 4 parafusos longos de

1,80 m e mais duas talas. Para tal, é indispensável o auxílio de um ajudante, pois ele é quem emboca o parafuso no furo e quem posiciona o martelo de aperto no parafuso.

3.8.2 Cortadeira

A finalidade da cortadeira (Figura 3.7) é de fazer uma face livre para facilitar o trabalho do explosivo durante a detonação, pois o plano de fogo não inclui pilão. Além disto, diminui consideravelmente o consumo de explosivos, o que por sua vez atenua o efeito da detonação nos pilares e teto da galeria.

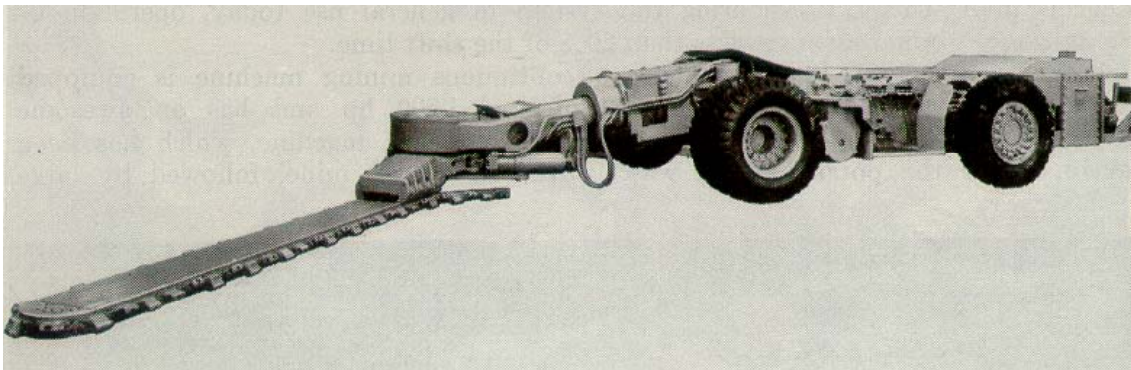


Figura 3.7 Cortadeira 15RU, Joy Mfg. Co.

O corte está situado a 70 cm do piso, com aproximadamente 15 cm de espessura e uma profundidade de 2,6 a 3,1 m. Outra função realizada pela cortadeira é a chamada escamação, onde o operador passa a lâmina nas paredes para retirar o carvão que está solto tanto na face quanto nas laterais da galeria. A dificuldade de operação provoca quebra de bits, pois o corte se dá justamente em uma região da camada que aloja concreções piríticas. O equipamento utilizado possui uma lança de 3,3 m e potência de 200 HP.

3.8.3 Perfuratriz de frente

O trabalho da perfuratriz de frente (Figura 3.8) está relacionado intimamente a qualidade do desmonte, pois o plano de fogo deve ser seguido o mais fiel possível ao projeto, evitando furos desviados, inclinação inadequada e conformação incorreta da galeria. O material detonado deve possuir um tamanho adequado ao seu transporte, facilitando o trabalho do *loader* e do alimentador. São feitos 13 furos por frente com diâmetro de bit de 45 mm e 3,10 m de lança.



Figura 3.8 Perfuratriz de frente.

A perfuratriz de frente é uma máquina sobre 4 pneus do tipo broca hidráulica rotativa, movida a motor elétrico 60 hp e bomba hidráulica de 608 litros.

A força hidráulica vem de uma bomba de engrenagens diretamente acionada por um motor elétrico. Todas as funções desta máquina são de operações hidráulicas. Os circuitos hidráulicos são protegidos por válvulas de alívio localizadas na secção de entrada de cada válvula de controle.

3.8.4 Loader

O *loader* JOY 14 BU (Figura 3.9) é o equipamento responsável pelo carregamento do ROM para o *shuttle car*. O *loader* tem a tração acionada por dois motores elétricos de corrente alternada que permitem duas velocidades distintas de deslocamento, denominadas de “alta e baixa”, e dois sentidos de deslocamento (para frente e para trás).

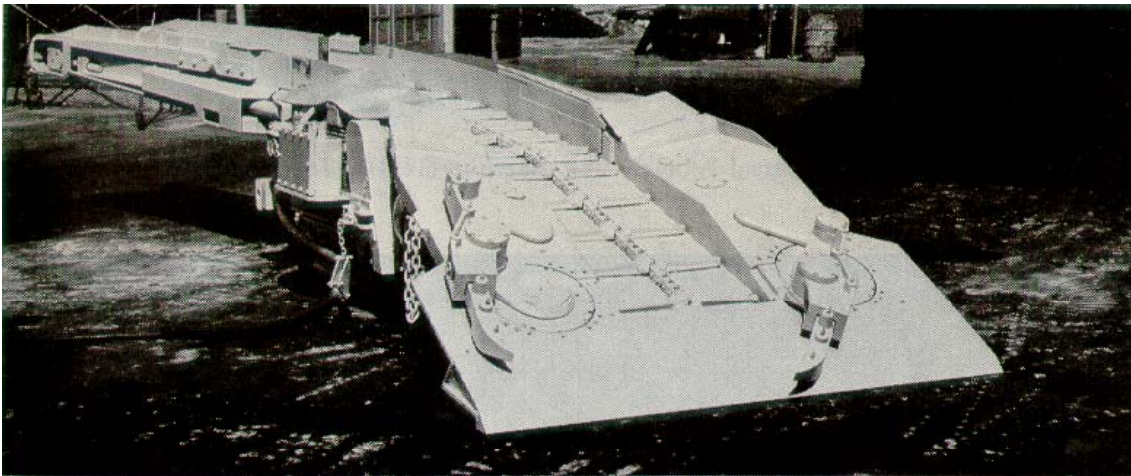


Figura 3.9 Loader 14BU10-10-41, Joy Mfg. Co.

O acionamento dos braços e da corrente transportadora é feito por dois motores elétricos de 50 C.V. cada um, localizados na cabeça coletora, os quais, por sua vez, são acionados através de embreagens multidiscos em banho de óleo, que protegem os motores.

O sistema hidráulico é acionado por um motor elétrico de corrente alternada de 10 C.V. de potência que, através da bomba de engrenagens, leva potência hidráulica para levantar a cabeça, girar e levantar a cauda e assim carregar o *shuttle car*.

Na mina, são utilizados dois *loaders*. Um deles atende dois *shuttle cars* e o outro atende um *shuttle car*. A capacidade de produção média do conjunto *loader/shuttle car* é de aproximadamente:

- 145 t /h para um *shuttle car*;
- 200 t /h para dois *shuttle cars*.

Esta taxa de produção leva em conta apenas o tempo efetivo de transporte do carvão nas variadas distâncias de transporte.

3.8.5 *Shuttle car*

Este tipo de equipamento foi introduzido nas minerações pelo mundo em 1939. O transporte do carvão até o alimentador é feito por meio de *shuttle car* com capacidade de 4,5 m³ ou 8,6 toneladas. O *shuttle car* Joy (Figura 3.10) é movido por 2 motores de corrente contínua de 30 CV cada um. O circuito hidráulico que faz funcionar a direção, a elevação da cabeça e o enrolador do cabo automático, é impulsionado por uma bomba dupla de engrenagens que, por sua vez, é movida por motor elétrico de corrente alternada de 25 CV. O acionamento da corrente transportadora do carvão é feito por motor de corrente alternada 25/12, 5 CV, acoplado a um redutor eixo sem-fim, o qual possibilita 2 velocidades de descarga.

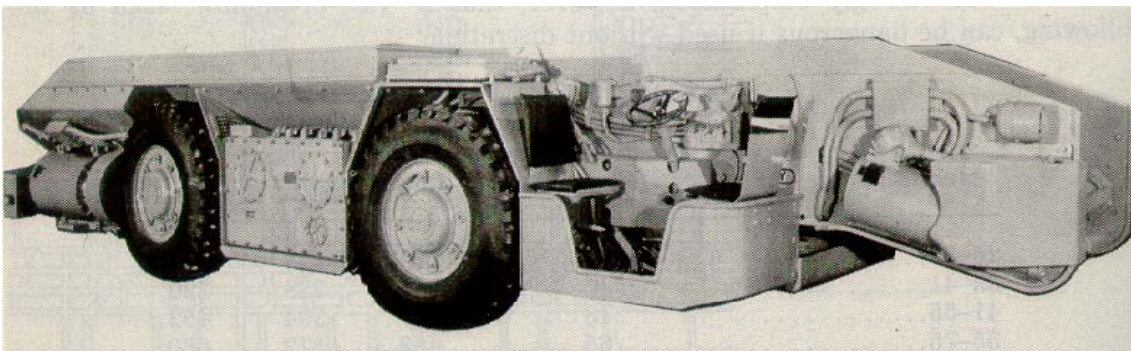


Figura 3.10 *Shuttle Car* 10SC-6, Joy Mfg. Co.

A máxima distância de transporte admitida para uma frente que utiliza dois *shuttle car* é de aproximadamente 152 metros. A tendência, no

entanto, é manter o deslocamento máximo abaixo de 122 m quando possível para agilizar o processo de limpeza, evitando se perdas de tempo em excesso de transporte. Usualmente o cabo elétrico é ancorado próximo a ponto de descarga, perto do alimentador.

3.9 Problemas operacionais na condução da lavra

Durante os trabalhos de lavra, alguns aspectos tiveram sua influência na produção discutida, os quais podem ser citados:

- i. Número de frentes ou galerias a serem utilizadas no painel de lavra;
- ii. Ordem de ocupação das frentes pelos equipamentos;
- iii. Geometria do painel da lavra;
- iv. Instabilidade no nível de produção;
- v. Melhoria da ventilação.

Estes aspectos estão relacionados ao assunto da dissertação direta ou indiretamente. Diretamente pelo fato de lidar com a produção do painel de lavra e indiretamente pelo fato de a ventilação ser afetada pelo modo que o trabalho é realizado. Assim, cada tópico não pode ser analisado de forma independente um do outro.

3.9.1 Número de frentes ou galerias a serem utilizadas no painel de lavra

Ao longo do tempo, os trabalhos de lavra no painel mostraram que um maior número de frentes disponíveis no painel de lavra, ocasiona uma maior taxa de produção. Tal hipótese vem diretamente dos trabalhos diários na mina, onde sempre o aumento na produtividade recaía sobre o número de frentes disponíveis no painel.

3.9.2 Ordem de ocupação das frentes

O fato de a lavra não ter uma ordenação pré-definida, torna o processo de tomada de decisão um fato complicado de ser executado justamente no decorrer dos trabalhos. Pode ocorrer uma boa tomada de decisão que eleve o nível de produção do seu turno, mas que deixe o painel de lavra desorganizado e sem opções adequadas de lavra ao próximo turno de trabalho, resultando então em uma baixa de produção.

3.9.3 Geometria do painel de lavra

A largura do painel de lavra tem sido mantida em um valor fixo (182 m) devido a fatores como operacionalidade, condições geológicas, etc. No entanto, para que haja um maior número de frentes sem aumentar o número de galerias é necessário um avanço diferenciado na lavra do painel. O método consiste em fazer um maior avançamento em duas ou três galerias, por alguns travessões à frente, próximo à correia transportadora, aumentando o número de frentes disponíveis e tornando o processo de transporte de carvão mais rápido. A Figura 3.11 mostra um esquema simples de visualização do avanço irregular do painel de lavra no dia 01/Nov/2002.

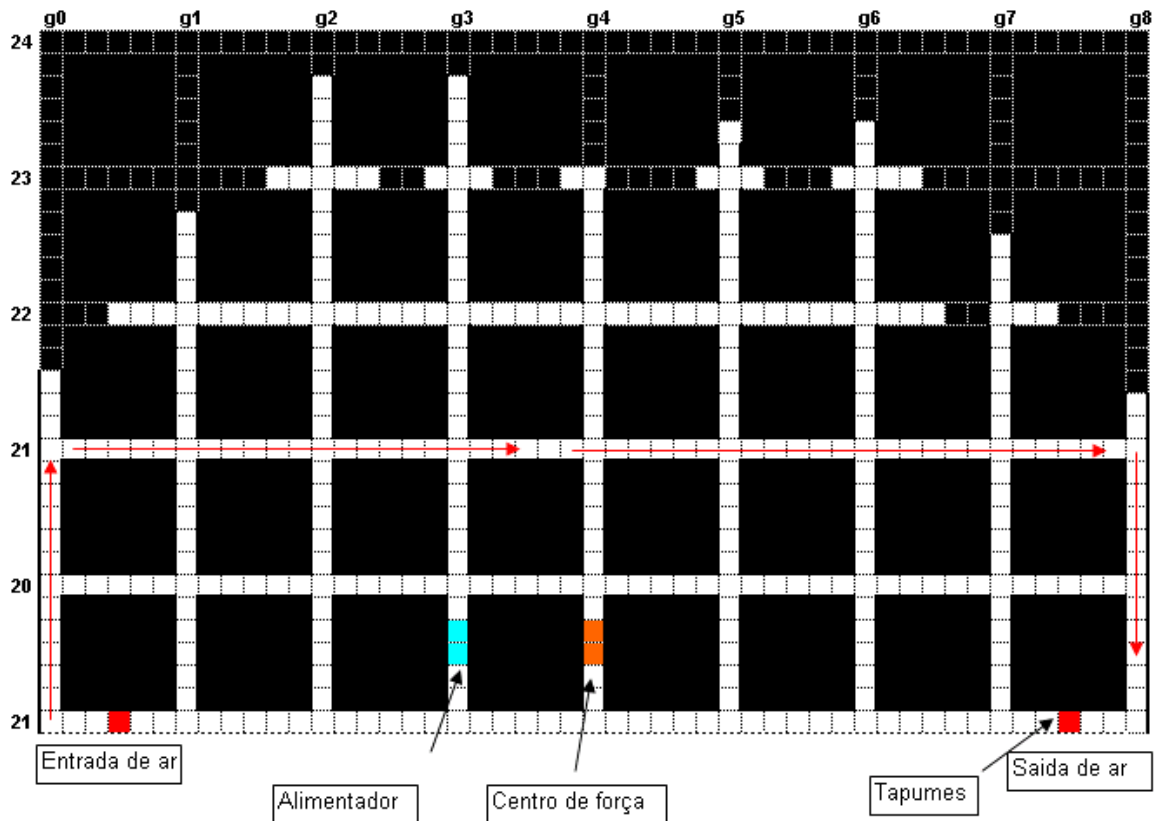


Figura 3.11 Avançamento irregular do Painel CM5 no mês de Novembro de 2002.

3.9.4 Instabilidade no nível de produção

O avanço em galerias preferenciais não se dá de forma sistemática ou organizada. O aumento do número de frentes é momentâneo, pois pode haver uma má estratégia de lavra que ocasione diminuição de frentes, compromete a produção como um todo. Pode acontecer um primeiro turno de trabalho com a produção esperada e um outro logo em seguida com uma produção muito inferior. Tal fato remete a uma impossibilidade de se ter uma previsão de produção diária ou ao longo de um certo período de tempo, isto é, a estimativa do nível diário de produção fica comprometida, atrelada à tomada de decisões instantâneas.

Outro motivo que causa a instabilidade de produção é o elevado número de paradas devido a quebras dos equipamentos. As quebras ocorrem freqüentemente durante o turno de trabalho, ocorrendo não só nos equipamentos de lavra, mas também no alimentador da correia transportadora.

3.9.5 Melhoria da ventilação

O fato de o painel não ter uma geometria regular em toda a sua extensão conforme a Figura 3.11, torna o processo de ventilação complicado de ser executado. O maior avanço de algumas galerias em relação a outras, dificulta em muito a ventilação justamente da porção mais avançada do painel. A colocação de ventiladores auxiliares não resolve plenamente a ventilação de um modo adequado. Assim, tanto o conforto dos operários, quanto à eliminação dos gases da detonação ficam difíceis de serem controlados de forma satisfatória.

3.9.6 Soluções para o problema proposto

A simulação computacional no caso específico deste trabalho irá atuar principalmente na organização de lavra, fazendo a tentativa de lavar as frentes no momento previamente estipulado. Isto se faz necessário para a avaliação de taxa de produção, onde se tem um esquema "rígido" de lavra sendo repetido por muitas vezes ao longo do avançamento do painel. Esta repetição no padrão de lavra é benéfica, visto que os operadores saberão de antemão a próxima frente a ser trabalhada ou os caminhos a serem percorridos de forma a minimizar o deslocamento. A supervisão torna se facilitada, pois as improvisações de escolhas de "frentes chaves" serão deixadas de lado, liberando o supervisor do turno a cumprir tarefas importantes durante o turno de trabalho, como, por exemplo, à inspeção da furação de uma frente para o posterior desmonte.

Com os tempos de equipamentos adquiridos nos trabalhos de campo pode-se fazer algumas simulações que retratem a atividade de cada equipamento. Pode-se escolher diferentes organizações de lavra e analisar a sua influência na produção de minério.

3.10 Turno de trabalho

O tempo de um turno total de trabalho na Mina Esperança é de 432 minutos, sendo que para o cálculo do tempo efetivamente destinado à produção de minério, deve ser descontado o tempo de transporte da superfície até o painel de lavra, retorno até a superfície ao final do turno e a parada para lanche logo da chegada no subsolo. A Tabela 3.1 ilustra os tempos necessários para cada atividade.

Tabela 3.1 Principais atividades no turno total de trabalho

Atividade	Minutos
Lanche	12
Transporte de ida	45
Transporte de volta	45
Tempo efetivo de trabalho	335

No turno de produção, todos os equipamentos estão ativos e a limpeza das frentes deve responder pelas frentes desmontadas (e ainda não removidas) no turno de preparação e também as desmontadas no próprio período de produção. O turno de produção tem como meta a limpeza das frentes já desmontadas previamente, escoramento das mesmas e proporcionar mais frentes disponíveis a serem limpas.

O dia de trabalho pode estar organizado em um ou dois turnos de produção (de acordo com a necessidade), um turno de manutenção e outro

de preparação. A capacidade de produção diária do painel varia de acordo com o regime de turnos e número de equipamentos operando.

3.11 Banco de dados coletado

O elemento principal para que sejam feitas as simulações é a tomada de tempos de operação de cada equipamento que compõe o ciclo produtivo. Para tal, boa parte do trabalho experimental da dissertação foi dedicada a coletar e analisar os ciclos dos equipamentos. A atividade que cada equipamento executa foi desmembrada em atividades menores para que se tenha uma visão geral das atividades que contribuem ao tempo total do ciclo. Esta tarefa é importante, pois mostra a contribuição individual de cada atividade no ciclo total de cada equipamento, podendo-se atuar diretamente na causa do problema, caso ele exista.

Para todas as atividades, os tempos H (espera), AO (transporte de pessoal) e HN (lanche) foram excluídos, pois se deseja uma estimativa para o tempo efetivamente empregado em cada etapa de produção.

3.11.1 Escoramento de teto

A composição do tempo total de escoramento T_E encontra-se discriminada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Atividades relacionadas ao escoramento de teto

t_{in} (início) = inspeção da Parafusadora de Teto + verificação da água + verificação de energia elétrica + deslocamento inicial ;

t_{vent} (ventilação)= organização da ventilação auxiliar;

t_{ab} (abastecimento)= abastecimento de óleo e/ou material de escoramento;

t_{pc} (parafusos curtos)= perfuração e colocação dos parafusos curtos - inclui alavancamento do teto;

t_{pl} (parafusos longos)= perfuração e colocação dos parafusos longos - conjunto parafuso curto+ tala + parafuso longo;

t_d (desloc_máquina)= deslocamentos entre galerias;

t_{bit} (bits)= troca de bits/hastes/punho

t_{hmc} (quebras)= paradas por problemas mecânicos/elétricos/manutenção corretiva em geral;

Assim T_E é definido por:

$$T_E = t_{in} + t_{vent} + t_{ab} + t_{pc} + t_{pl} + t_d + t_{bit} + t_{hmc} \quad (3.1)$$

De acordo a coleta de dados de tempos de ciclo de Agosto/02, a duração das atividades que compõe o escoramento de teto para a parafusadora de teto 10 (PT10) e parafusadora de teto 4 (PT4) estão registrados na Tabela 3.3 e 3.4, respectivamente.

Um dado importante a ser levado em conta no escoramento é o tipo de teto a ser escorado, isto é, dureza da rocha, as características geomecânicas da mesma.

Tabela 3.3 Atividades da PT 10

Atividade	Tempo de realização médio (min/frente)
t_{in}	0,2
t_{vent}	3,3
t_{ab}	1,9
t_{pc}	32,4
t_{pl}	23,1
t_d	5,4
t_{bit}	1,3
t_{hmc}	7,7
T_E	75,3

Tabela 3.4 Atividades da PT 4

Atividade	Tempo de realização médio (min/frente)
t_{in}	0,6
t_{vent}	0,2
t_{ab}	4,0
t_{pc}	29,5
t_{pl}	18,2
t_d	4,0
t_{bit}	1,4
t_{hmc}	4,1
T_E	62,0

3.11.2 Corte da camada de carvão

A operação de corte da camada de carvão foi dividida nas seguintes atividades (Tabela 3.5):

Tabela 3.5 Atividades relacionadas ao corte da camada de carvão

t_{in}	= início (não há rotina específica);
t_{bc}	= batendo centro e engatando a mangueira d'água;
t_{cor}	= cortando a face;
t_{lim}	= limpando o banco;
t_d	= deslocamento entre galerias do equipamento;
t_{bit}	= troca de bits;
t_{hmc}	= paradas por problemas mecânicos/elétricos/manutenção corretiva em geral;

T_C fica então definido por:

$$T_C = t_{in} + t_{bc} + t_{cor} + t_{lim} + t_d + t_{bit} + t_{hmc} \quad (3.2)$$

De acordo com a coleta de dados de tempos de ciclo de Agosto/02, a duração das atividades que compõe o corte da camada de carvão ficou assim definida (Tabela 3.6):

Tabela 3.6 Atividades da Cortadeira

Atividade	Tempo de realização médio (min/frente)
t_{in}	0,0
t_{bc}	1,8
t_{cor}	11,0
t_{lim}	3,5
t_d	5,0
t_{bit}	4,3
t_{hmc}	8,2
T_C	33,8

3.11.3 Furação da face

A operação de furação está dividida nas atividades apresentadas na Tabela 3.7:

Tabela 3.7 Atividades relacionadas à furação da face

t_{in} = abastecimento com óleo hidráulico, lubrificando adaptador d'água, posicionando cabos;

$t_{água}$ = engate da mangueira d'água;

t_{bit} = desligando a energia no centro de força, troca de bits;

t_{fur} = furando a frente de serviço;

t_d = deslocamento entre galerias do equipamento;

t_{hmc} = paradas por problemas mecânicos/elétricos/manutenção corretiva em geral;

O tempo de furação total T_F é dado por:

$$T_F = t_{in} + t_{água} + t_{bit} + t_{fur} + t_d + t_{hmc} \quad (3.3)$$

De acordo com a coleta de dados de tempos de ciclo de Agosto/02, a duração das atividades que compõe a furação de frente ficou assim definida (Tabela 3.8):

Tabela 3.8 Atividades da Perfuratriz de frente

Atividade	Tempo de realização médio (min/frente)
t_{in}	1,3
t_{agua}	0,3
t_{fur}	12,8
t_d	4,2
t_{bit}	1,2
t_{hmc}	6,3
T_F	26,1

3.11.4 Desmonte

Este tópico apresenta os dados de tempos de desmonte de rocha com explosivos coletados em setembro/2002. A operação de furação está dividida nas atividades apresentadas na Tabela 3.9

Tabela 3.9 Atividades relacionadas ao desmonte

t_{in} = inspeção da frente de lavra;
t_{tex} = transporte de explosivos;
t_{tac} = transporte de acessórios ;
t_{car} = carregamento do explosivo na frente ;
t_{det} = tempo de detonação ;
t_{sob} = tempo de recolhimento de sobras;
t_{ffa} = tempo de detonar fogo falhado

O tempo de desmonte total T_D é dado por:

$$T_D = t_{in} + t_{ex} + t_{ac} + t_{car} + t_{det} + t_{sob} + t_{ffa} \quad (3.4)$$

Tabela 3.10 Atividades de carregamento de explosivos

Atividade	Tempo de realização médio (min/frente)
t_{in}	2,9
t_{tex}	8,7
t_{tac}	3,7
t_{car}	11
t_{det}	2,3
t_{sob}	0,6
t_{ffa}	0,6
T_E	29,8

3.11.5 Limpeza da frente com *loader* e *shuttle car*

O processo de carregamento do carvão no caso da utilização do conjunto *loader/shuttle car* torna-se de difícil estudo quando se analisa separadamente tais equipamentos, devido ao grande número de variáveis que envolvem tal processo. O método adotado então foi relacionar o tempo de limpeza de uma frente com a distância que o minério percorre até o alimentador, levando em conta a utilização de um ou dois *shuttle car*. A capacidade de transporte para cada *shuttle car* é de 8,6 toneladas, valor medido na empresa considerando o número de viagem e pesos registrados na balança.

O tempo para realizar a limpeza de uma frente (T_L) com 9 viagens de *shuttle car* e um *loader* em operação conjunta pode ser estimado pelo somatório dos tempos relacionados na Tabela 3.11

Tabela 3.11 Atividades relacionadas à limpeza de frentes

t_{in} = início (não há rotina específica);

t_{lim} = tempo de limpeza de uma frente contando com 1 ou 2 *shuttle car*;

t_d = deslocamento do *loader* entre galerias;

t_{hmc} = inclui todas as paralisações do conjunto *loader+shuttle car*.

Equação para T_L :

$$T_L = t_{in} + t_{lim} + t_d + t_{hmc} \quad (3.5)$$

De acordo com a coleta de dados de tempos de ciclo de Agosto/02, a duração das atividades que compõe a limpeza de frente ficou assim definida (Tabela 3.12 e 3.13):

Tabela 3.12 Limpeza com um *Shuttle car*

Atividade	Tempo de realização médio (min/frente)
t_{in}	0,0
t_{limp}	32,9
t_d	5,4
t_{hmc}	0,6
T_L	38,9

Tabela 3.13 Limpeza com dois *Shuttle car*

Atividade	Tempo de realização médio (min/frente)
t_{in}	0,0
t_{limp}	23,5
t_d	5,4
t_{hmc}	0,6
T_L	29,5

3.12 Principais atividades realizadas em cada operação

Cada atividade desempenhada por um equipamento tem uma contribuição maior ou menor no ciclo de operação. Algumas atividades podem ter uma ou mais etapas principais que acabam por tomar boa porcentagem do tempo total de ciclo. Um exemplo pode ser a quebra de um equipamento, que ocorre ao longo de um turno de produção.

Dentre as atividades específicas de cada operação, foram escolhidas tarefas principais para a construção de histogramas. Os histogramas mostram graficamente a distribuição dos dados coletados. As Tabelas 3.14 a 3.21 mostram algumas das atividades em cada operação acompanhada de seus respectivos histogramas (Figuras 3.12 a 3.20).

Tabela 3.14 Participação das principais atividades no ciclo de corte

Corte da camada	
Atividade Desempenhada	Participação no ciclo (%)
t_{cor}	32,5
t_{lim}	10,4
Soma total	42,9

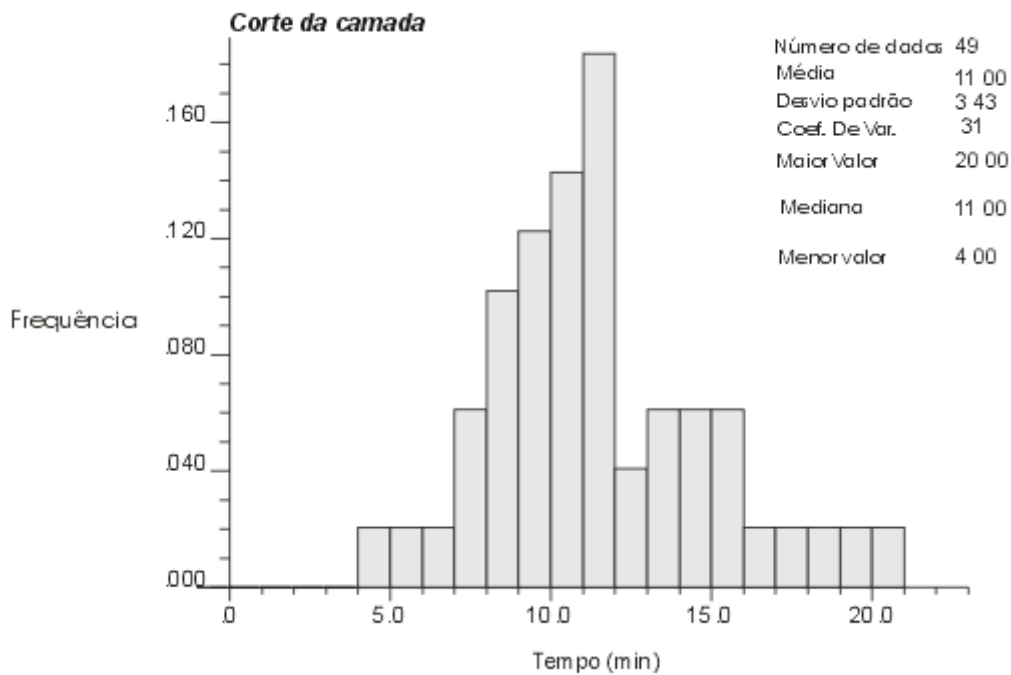


Figura 3.12 Distribuição de freqüências para a etapa de corte da camada de carvão.

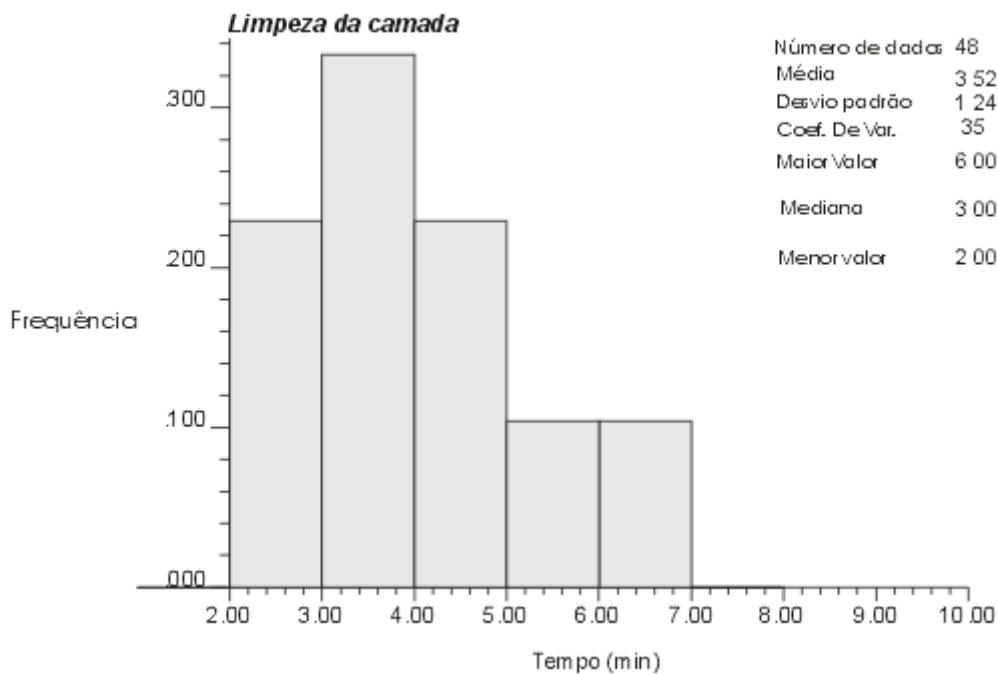


Figura 3.13 Distribuição de freqüências para a etapa de limpeza da camada de carvão.

Tabela 3.15 Participação das principais atividades no ciclo de perfuração

Furação de frente	
Atividade Desempenhada	Participação no ciclo (%)
t_{fur}	49
Soma total	49

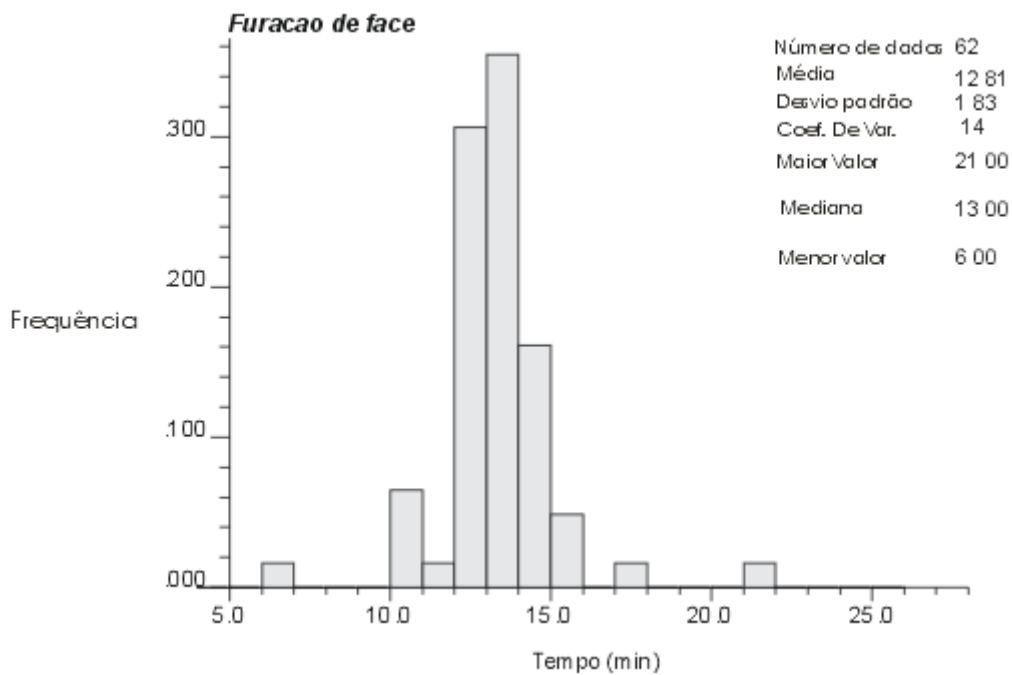


Figura 3.14 Distribuição de frequências para a etapa de furação de face da camada de carvão.

Tabela 3.16 Participação das principais atividades no ciclo de desmonte

Desmonte	
Atividade Desempenhada	Participação no ciclo (%)
t_{tex}	29,2
t_{tac}	12,4
t_{car}	36,9
t_{det}	7,7
Soma total	86,2

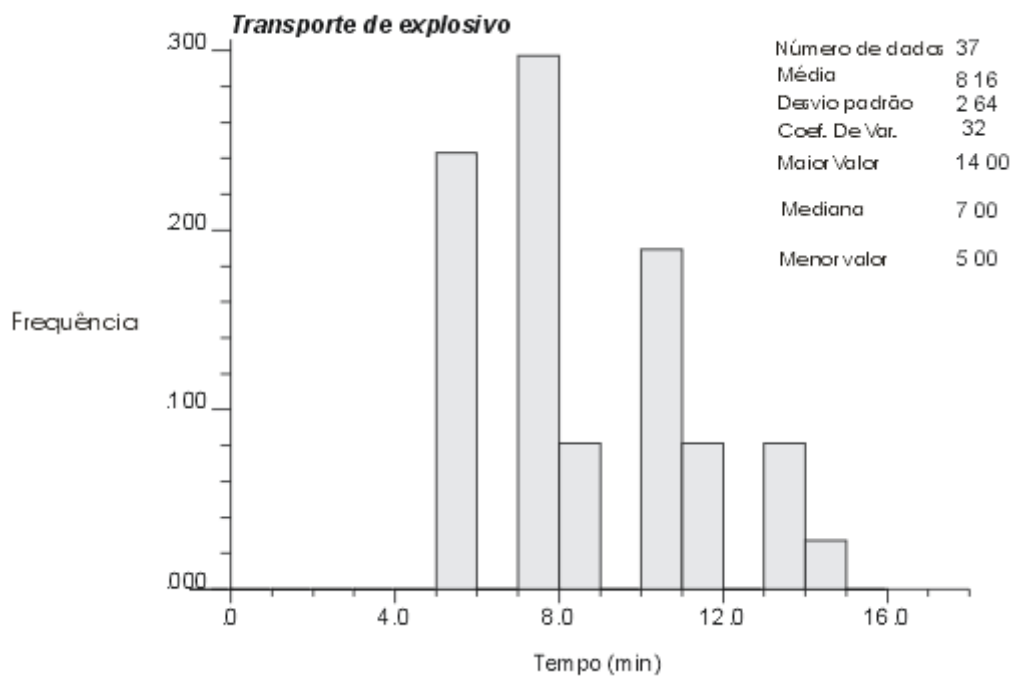


Figura 3.15 Distribuição de frequências para a etapa de transporte de explosivos.

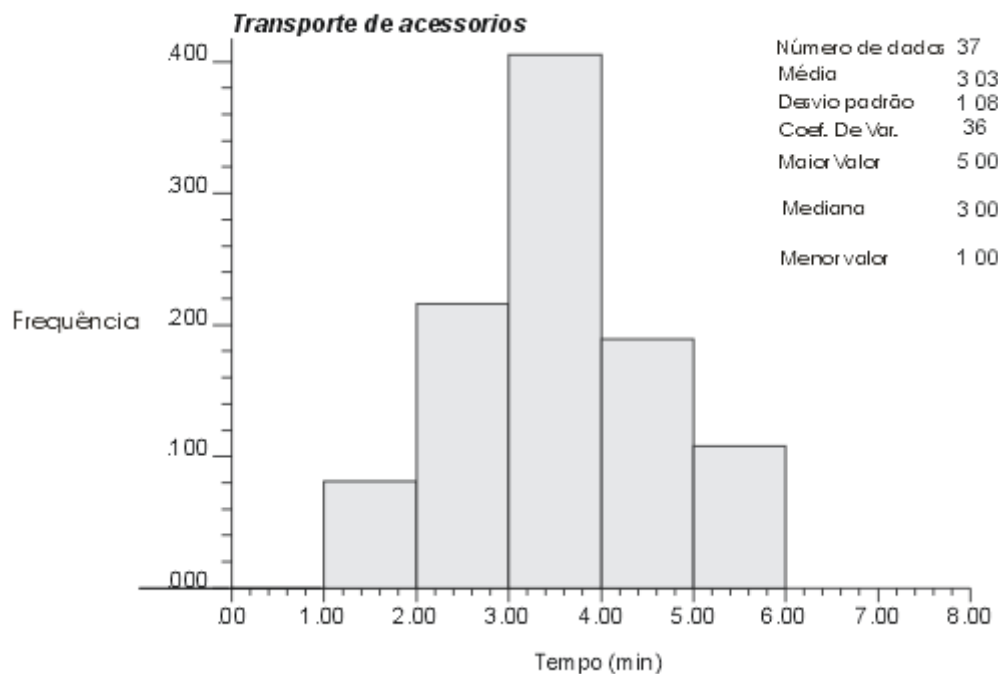


Figura 3.16 Distribuição de frequências para a etapa de transporte de acessórios.

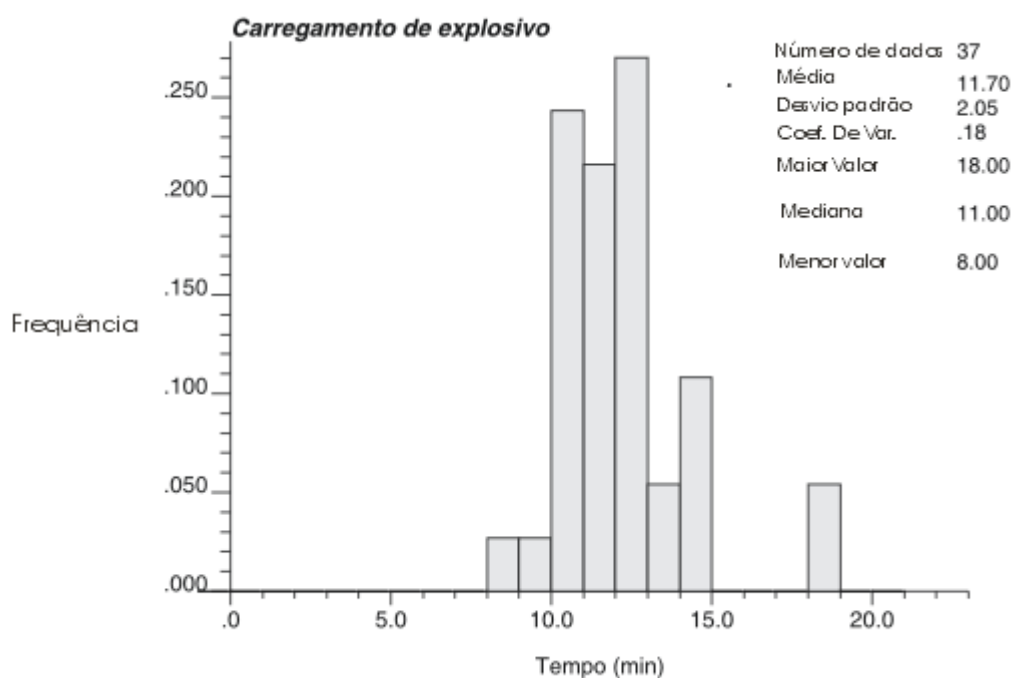


Figura 3.17 Distribuição de freqüências para a etapa de carregamento de explosivo.

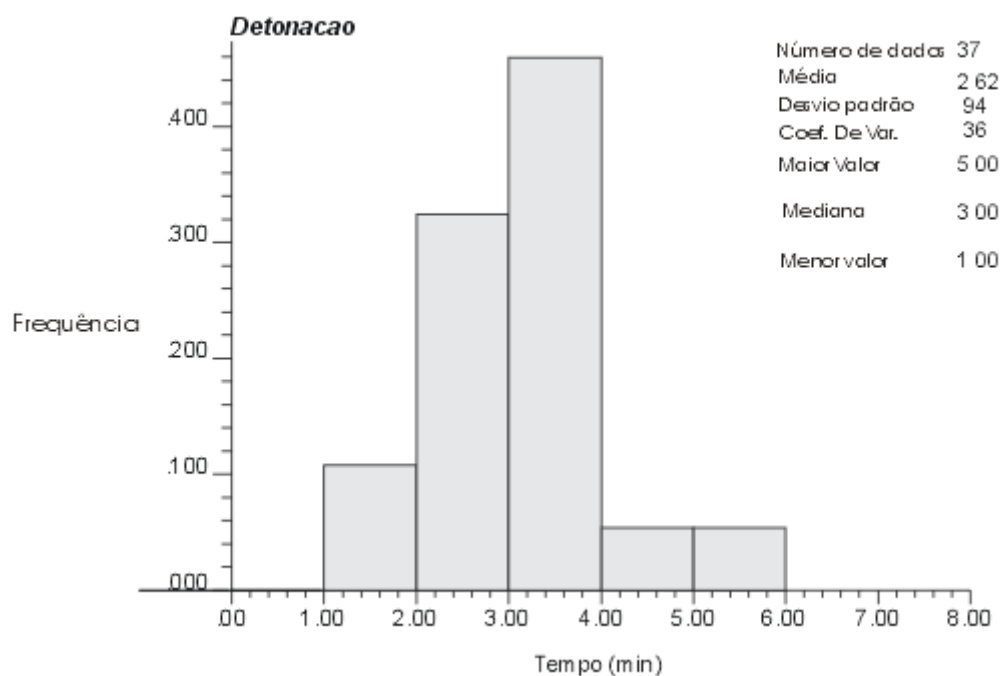


Figura 3.18 Distribuição de freqüências para a etapa de detonação.

Tabela 3.17 Participação das principais atividades no ciclo de limpeza

Carregamento e transporte		
Atividade Desempenhada	Situação	Participação no ciclo (%)
t_{limp}	1 loader + 2 sc	79,7
t_{limp}	1 loader + 1 sc	85,1

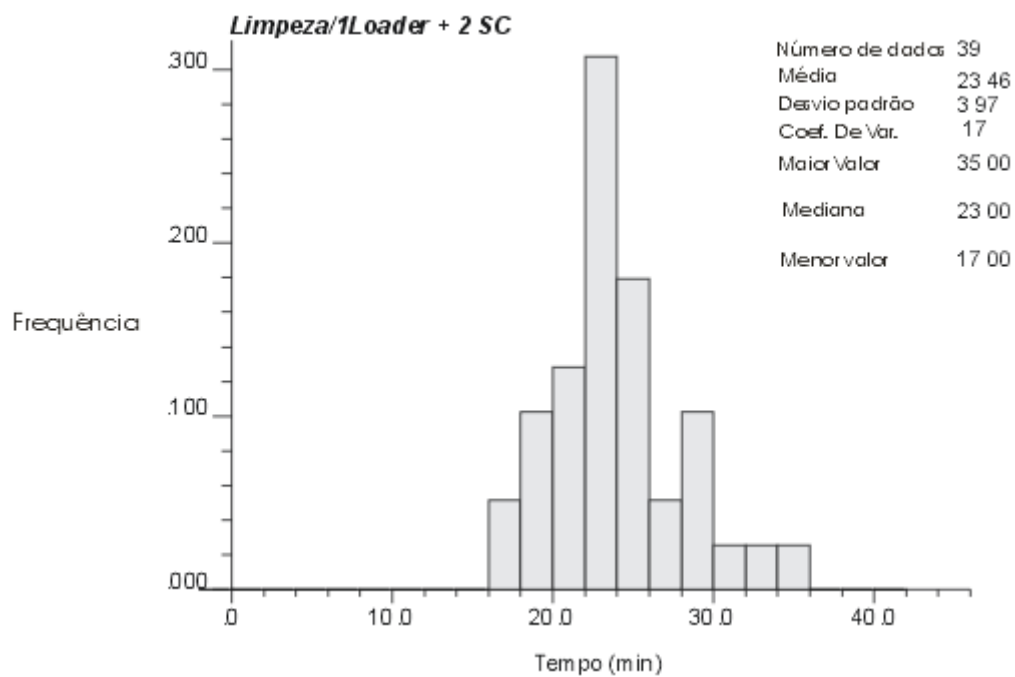


Figura 3.19 Distribuição de frequências para a etapa de carregamento e transporte de minério com uso de dois *shuttle cars*(SC).

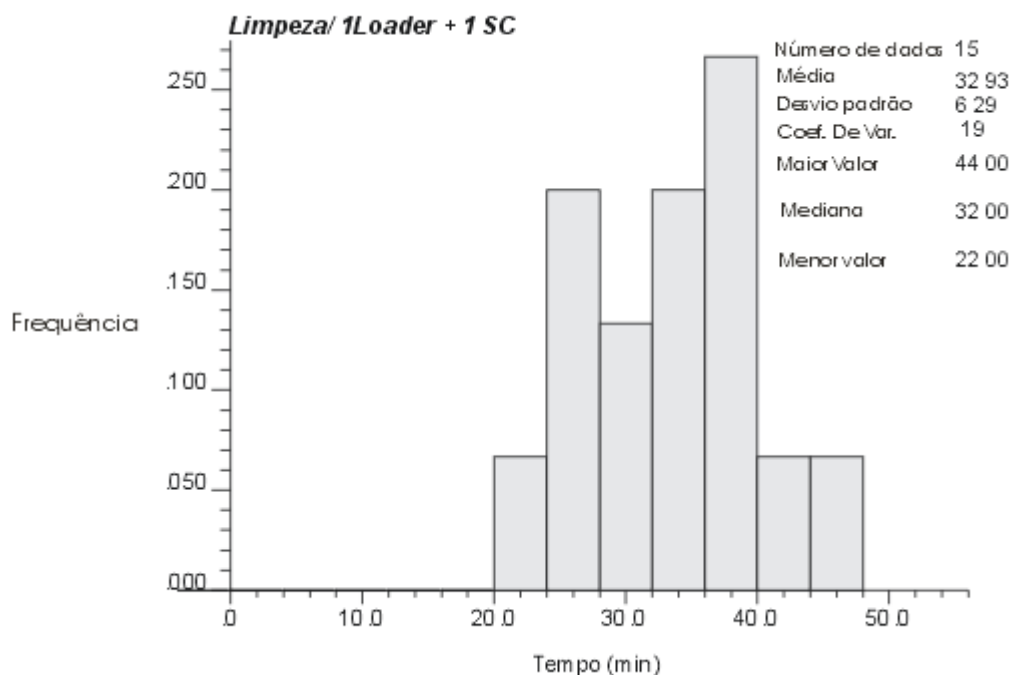


Figura 3.20 Distribuição de frequências para a etapa de carregamento e transporte de minério com uso de um *shuttle car*(SC).

3.13 Tempos de esperas e quebras dos equipamentos

O tempo de espera dos equipamentos para a realização de sua tarefa é um importante fator do ponto de vista operacional. Um equipamento parado pode dar indícios de desbalanceamento do sistema de produção. A espera está relacionada diretamente ao tempo de operação de cada etapa que compõe o sistema, onde operações mais rápidas tendem a ter um maior número de esperas.

As esperas dos equipamentos por novas frentes de trabalho para o Conjunto Mecanizado CM5 também foram contabilizadas. Os tempos de espera retratam os tempos médios por frente de trabalho para cada atividade. A Tabela 3.18 mostra os resultados.

Tabela 3.18. Tempos médios de esperas por frentes

Atividade	Tempo médio de esperas (min/frente)
Escoramento - PT 4	2,1
Escoramento - PT 10	8,5
Corte	2,75
Perfuração de frente	11,8
Desmonte	14,2
Limpeza da frente	3,1

A própria análise do banco de dados forneceu os elementos necessários para a identificação de vários pontos problemáticos em termos de operação e dos “gargalos” de produção, sobre os quais boa parte da atenção do corpo técnico da empresa está voltada.

Uma das maiores dificuldades enfrentadas no turno de trabalho são as excessivas quebras de equipamentos, vindo a prejudicar muitas vezes o bom andamento dos trabalhos e conseqüentemente, afetando a produção de carvão. A Tabela 3.19 mostra o resumo da porcentagem de tempo gasto em quebras eletromecânicas para os equipamentos em relação ao tempo total de operação.

Tabela 3.19. Percentual do tempo gasto em quebras

Equipamento	Tempo Total(min)	t_{hmc}^* (min)	Percentual %
PT 4	62	4,1	7
PT 10	75,3	7,7	10
Cortadeira	33,8	8,2	24
Perfuratriz de frente	26,1	6,3	24
<i>Loader/1SC</i>	38,9	0,6	2
<i>Loader/2SC</i>	29,5	0,6	2

*tempos de paradas eletromecânicas. SC = *shuttle car*

3.14 Cálculo da produção por turno para cada equipamento

Uma simples análise dos tempos de serviços pode dar uma boa idéia da capacidade de operação do sistema. Considerando-se um turno com tempo total de 432 minutos, tempo efetivo trabalhado de 335 minutos, tempos coletados e a característica do painel no tempo em que os dados foram colhidos, a produção máxima de cada equipamento sem que houvesse esperas seria:

Cortadeira		9,9 frentes
Perfuração de frente		12,8 frentes
Desmonte		11,2 frentes
Limpeza		
	com 1 <i>shuttle car</i>	8,6 frentes
	com 2 <i>shuttle car</i>	11,4 frentes
Escoramento de teto		
	Parafusadora 4	5,4 frentes
	Parafusadora 10	4,4 frentes

Teoricamente se obteria uma produção no painel de 20 frentes considerando se a capacidade de limpeza do conjunto *loader/shuttle car*. Considerando-se a produção das parafusadoras de teto como gargalo do sistema, seria possível a produção de 10 frentes. Isto constata a necessidade de se iniciar o turno já com algumas frentes desmontadas.

Caso a perda de tempo por falhas mecânicas fosse estimada como sendo nula para todos os equipamentos, se teria o ganho de uma frente a mais escorada, aproximadamente três frentes a mais de corte e quatro

frentes a mais furadas. As frentes limpas se manteriam constantes, indicando assim, neste caso, que o "gargalo" de produção ainda seria o parafusamento de teto.

3.15 Tempo máximo e mínimo para um ciclo total em uma frente

Tendo-se os tempos médios para cada operação, pode-se estimar um tempo aproximado para que cada frente seja completamente trabalhada, isto é, o tempo para todas as operações ocorrerem.

A Figura 3.21 mostra a porcentagem de tempo ocupado por cada equipamento no ciclo total em uma frente de lavra. Considerando os tempos médios, temos o tempo mínimo em que uma frente possa ser completamente trabalhada, utilizando-se dois *shuttle car* e a parafusadora de teto mais rápida. Assim, o tempo total de ciclo em uma frente fica em torno de 181,2 minutos.

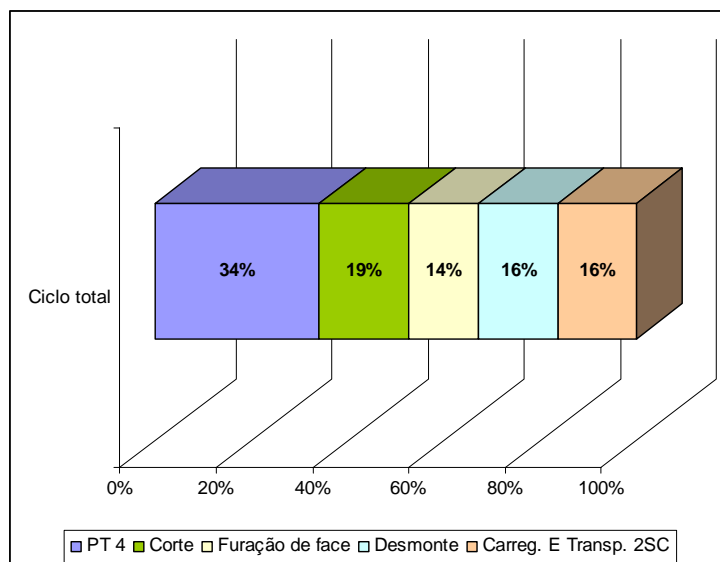


Figura 3.21 Distribuição dos tempos de operação no ciclo total com a parafusadora 4 e dois shuttle car.

Já na Figura 3.22, temos a percentagem de tempo máximo médio em que uma frente pode ser completamente trabalhada, utilizando-se um *shuttle car* e a perfuratriz de teto mais lenta aumentando o tempo total de trabalho na frente, que passa a ser de 203,9 minutos.

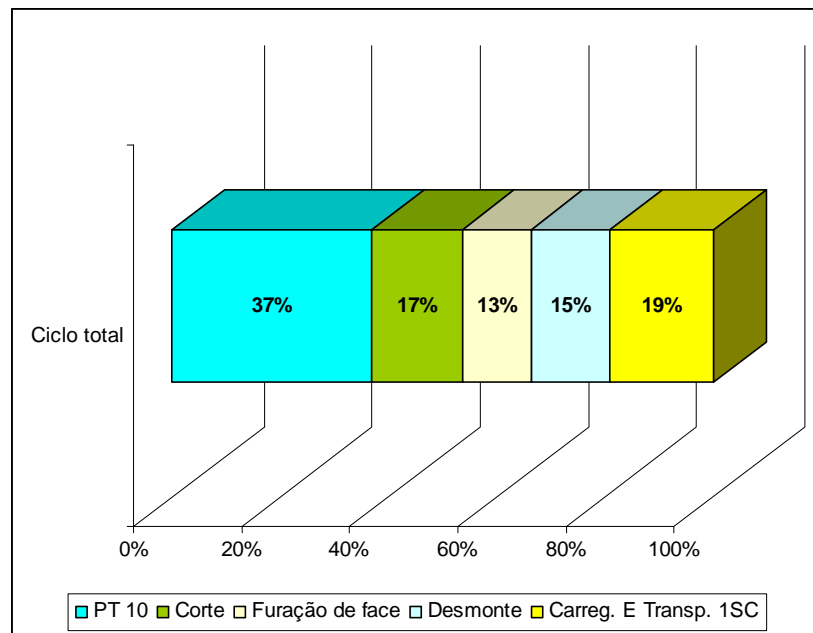


Figura 3.22 Distribuição dos tempos de operação no ciclo total com a parafusadora 10 e um *shuttle car*.

3.16 Regressões de tempos de deslocamento para os equipamentos

A coleta de dados foi tomada de forma exaustiva e a partir dela, pode-se traçar, também, regressões de tempos de deslocamentos para os equipamentos em função da distância percorrida. Embora tais regressões não tenham sido utilizadas diretamente no simulador computacional, elas podem ser usadas como um importante parâmetro ou característica para se avaliar o impacto dos deslocamentos durante o ciclo do equipamento. Os

gráficos de correlação estão no Anexo 2, e as equações de tempos (em minutos) são as seguintes:

PT 4: $t = 0,0416x + 1,2065$ (3.6)

PT10: $t = 0,0529x + 2,0642$ (3.7)

Cortadeira: $t = 0,1228x - 3,1758$ (3.8)

Perfuratriz de frente: $t = 0,0279x + 1,5165$ (3.9)

Loader: $t = 0,0257x + 2,5899$ (3.10)

Limpeza com 1 sc $t = 0,1915x + 8,7376$ (3.11)

Limpeza com 2 sc $t = 0,058x + 18,232$ (3.12)

Onde x é a distância em metros e t é o tempo de deslocamento do equipamento em minutos.

As distâncias médias percorridas são apresentadas na Tabela 3.20 abaixo, juntamente com o respectivo tempo de deslocamento e tempo de deslocamento real medido. Nota-se que as equações refletiram de maneira satisfatória a correlação entre tempos medidos e tempo estimado.

Tabela 3.20. Comparação dos tempos medidos contra tempos estimados pelas equações de tempo de deslocamento

Equipamento	Distância Média (m)	Tempo de deslocamento medido (min)	Tempo estimado de deslocamento (min)
PT 4	66	4,0	3,9
PT 10	63	5,4	5,4
Cortadeira	93	5,0	8,2
Perfuratriz de frente	96	4,2	4,2
<i>Loader/1SC</i>	117	32,9	31,1
<i>Loader/2SC</i>	116	23,5	24,9

Vale ressaltar que a equação 3.8 não refletiu adequadamente o deslocamento da cortadeira, impossibilitando assim o seu uso com segurança.

Por fim, do ponto de vista dos trabalhos realizados e do acompanhamento dos turnos, pôde-se perceber que o sistema de produção exigiria uma melhor organização no painel de lavra, e que perdas de produção por problemas eletro-mecânicos são altas, passando a ser um fator fundamental na produção diária de minério.

Este capítulo dedicou-se exclusivamente a apresentar os equipamentos utilizados e seus respectivos tempos de ciclo, mostrando o trabalho pioneiro na Mina Esperança quanto à coleta de tempos de ciclos de suas operações. O próximo capítulo tratará de apresentar o simulador desenvolvido mostrando suas características e funções.

CAPÍTULO 4 – O SIMULADOR COMPUTACIONAL

4.1 Introdução

O capítulo quatro apresentará o simulador de produção desenvolvido como ferramenta de auxílio na produção de minério da Mina Esperança. Será detalhado todo o funcionamento do simulador, levando em conta as características operacionais de mineração. Este capítulo será complementado pelo capítulo cinco, onde será apresentado um estudo de caso.

4.2 O simulador

A perspectiva, quando se parte para o uso de simulação computacional de um sistema de produção, é a de ter-se à disposição um software que serve para prever, aproximadamente, os resultados do sistema real antes mesmo dele operar. Do ponto de vista do trabalho, esta é também a idéia com relação à simulação de operações dos conjuntos mecanizados. A coleta de dados abrangente serviu para caracterizar cada uma das atividades que fazem parte do ciclo completo de produção, obtendo resultados que descrevem as linhas gerais de operação do sistema (conjuntos mecanizados). De acordo com as características operacionais do sistema, foi idealizado um simulador descrito neste capítulo.

O processo de simulação computacional consome algum tempo, devendo-se cumprir certas etapas para a obtenção de resultados. O processo de simulação, no presente caso, não é automático. Para usar simulação, é preciso preparar dados de entrada, simular o período de produção e interpretar os dados do simulador.

O simulador de produção desenvolvido neste trabalho usou como base o Microsoft Excel® em conjunto com o Microsoft Visual Basic® como exposto no item 2.10. Para operar o simulador não é necessário nenhum conhecimento de programação por parte do usuário, apenas é exigido treinamento com o sistema utilizado. O usuário tem controle sobre a movimentação dos equipamentos e entradas de tempos específicos para cada operação.

Existe um painel esquemático do sistema câmaras e pilares, onde o usuário decide onde alocar os equipamentos. A escolha é totalmente livre, exigindo que o usuário tenha um relativo conhecimento da operação, afim de que o posicionamento dos equipamentos nas frentes de lavra seja executado corretamente durante a simulação. Cada equipamento tem seu módulo de obtenção dos tempos para a simulação, onde pode ser atualizado pelo usuário do simulador. Assim, os tempos de tarefas essenciais bem como os tempos de tarefas complementares como inspeção do equipamento, ligação à rede de água, por exemplo, podem ser alterados pelo usuário, sem a necessidade de reprogramar o simulador.

Em uma visão inicial do simulador, pode se dizer que o usuário pode explicitar o tempo de turno que achar necessário e a partir dele, iniciar a simulação. Existe um contador geral de tempo que vai sendo atualizado à medida que os tempos acumulados dos equipamentos vão avançando em cada contador particular. Quando não for mais possível a realização de outra atividade, o programa avisa ao usuário a impossibilidade de continuar com a simulação, e ao final de todas as atividades, exibe a tonelagem

transportada por hora. As outras funções serão apresentadas e explicadas detalhadamente no item 4.4.

O simulador é baseado em simulação discreta onde cada evento tem o momento exato de acontecer. Segundo Law & Kelton (1991), um evento é definido como uma ocorrência instantânea que pode mudar o estado do sistema.

4.2.1 Mecanismo de avanço do tempo

Chama-se de relógio de simulação a variável em um modelo de simulação que dá o valor corrente de tempo simulado. Historicamente, o modelo "tempo de avanço do próximo evento" tem sido usado amplamente. Com este modelo, o relógio de simulação é iniciado no zero e os tempos dos futuros eventos são determinados. O relógio é então avançado para o próximo evento a ocorrer sendo assim atualizado e, feito isto, tem-se a próxima tarefa a ser executada (Figura 4.1). Este processo de avanço do relógio de simulação de um evento a outro é contínuo até que seja imposto um limite de tempo para a parada.

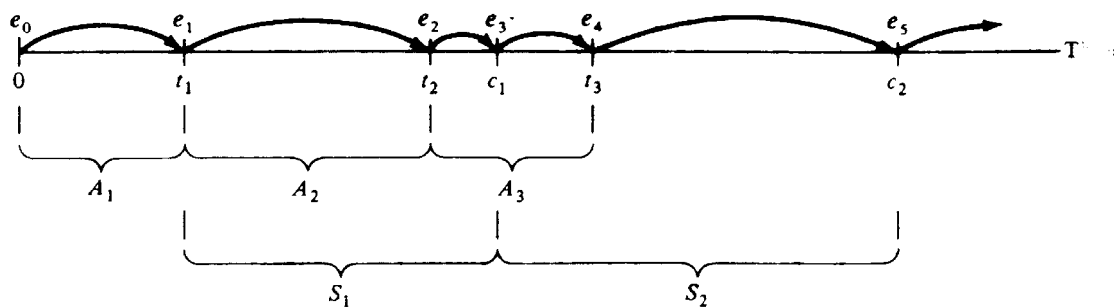


Figura 4.1 Avanços do relógio do simulador.

- t_i : tempo de chegada
- A_i : $t_i - t_{i-1}$
- S_i : tempo gasto
- D_i : atraso

c_i : $t_i + d_i + S_i$ serviço completo

e_i : tempo de ocorrência

4.2.2 Alocação de equipamentos e tempos de operação

Os tempos médios provenientes da coleta de dados traduzem melhor as características reais do sistema para a situação proposta. Ao contrário de utilizar apenas as médias obtidas dos dados coletados, o usuário pode decidir sobre o valor de tempo que achar necessário para alguma tarefa específica do equipamento.

O simulador desenvolvido tem a vantagem de o usuário escolher exatamente onde pretende alocar cada equipamento. A única limitação é que cada equipamento tem o momento certo (tempo) de ser realocado. Os simuladores em geral, sempre têm caminhos pré-definidos a serem executados.

No caso do sistema câmaras e pilares, o usuário pré define o ordenamento de lavra e toda a simulação se dá com base neste esquema rígido de planejamento. Como exemplo, a Figura 4.2, tirada de Shafrick, (2001), mostra a ordem em que os avanços são executados pelo simulador desenvolvido em seu trabalho, sendo representado por números.

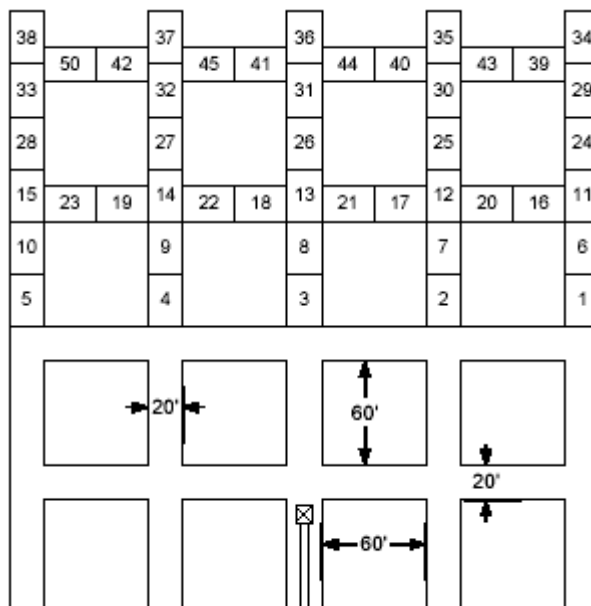


Figura 4.2 Avanços pré-estabelecidos na simulação.

O simulador permite ao usuário acompanhar exatamente o passo que cada equipamento dá durante o turno de trabalho. Caso exista um avançamento pré-definido, o usuário pode mudar completamente a estratégia de trabalho. O programa se mostra muito útil, também, em treinamento de pessoal, onde os passos no simulador são dados, acompanhados, visualizados, podendo ser analisados e discutidos por quem atua na lavra.

4.3 Geração dos tempos dos equipamentos

A geração dos tempos de atividades dos equipamentos como exposto anteriormente tem várias composições. Os tempos são gerados a partir da soma dos tempos de cada variável. Para tal caso, foram escolhidas as atividades principais de cada equipamento. Uma destas funções, por exemplo, pode ser o tempo exigido para a furação de frente ou tempo de corte da camada.

A outra parte dos tempos são operações complementares a realização das tarefas de cada equipamento, como o tempo de deslocamento, troca de bits, tempos gastos em paralisações por quebras de equipamentos, em fim, cada tarefa auxiliar em determinada operação.

4.3.1 Exemplo de composição dos tempos

Como exemplo de geração dos tempos de atividades dos equipamentos, será apresentada a atividade de furação da camada de carvão, mostrando como o tempo final é obtido. A furação da camada tem as seguintes atividades básicas (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Atividades relacionadas à furação da camada de carvão

t_{in}	= abastecimento com óleo hidráulico, lubrificando adaptador d'água, posicionando cabos;
$t_{água}$	= engate da mangueira d'água;
t_{bit}	= desligando a energia no centro de força, troca de bits;
t_{fur}	= furando a frente de serviço;
t_d	= deslocamento entre galerias do equipamento;
t_{hmc}	= paradas por problemas mecânicos/elétricos/manutenção corretiva em geral;

As tarefas que fazem parte da furação que entram como tempos fixos, calculados pela média das operações amostradas por frente são listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Tempos médios por frente das atividades auxiliares a furação da camada de carvão

$t_{in} =$	1,3 min
$t_{agua} =$	0,3 min
$t_{bit} =$	1,2 min
$t_{fur} =$	12,8 min
$t_d =$	4,2 min
$t_{hmc} =$	6,3 min

O tempo total de simulação para a etapa de furação da camada é o tempo da atividade principal acrescido dos tempos complementares.

Este processo ou outros são automaticamente realizados sempre que o equipamento for realizar um novo trabalho, sendo que cada equipamento tem um botão específico no menu do simulador.

Para as parafusadoras de teto, preferiu-se relacionar o tempo da atividade principal com a quantidade e comprimento dos parafusos curtos e longos. Tal decisão foi tomada devido à possibilidade de se adotar uma nova quantidade de parafusos, bem como diferentes comprimentos em caso de mudança de característica geomecânica do teto (Anexo 1).

4.4 Módulos do simulador

Este tópico irá apresentar os módulos do simulador e as características básicas. O simulador pode ser dividido em três módulos distintos:

- i. Módulo de posicionamento dos equipamentos;
- ii. Módulo de controle de contagem dos tempos totais, esperas, produção;

- iii. Módulo de controle dos tempos individuais dos equipamentos de lavra.

4.4.1 Módulo de posicionamento dos equipamentos

Neste módulo, o usuário tem o controle sobre o posicionamento dos equipamentos, podendo fazer sua alocação onde for necessário. A única restrição é movimentar-se os equipamentos no momento exato indicado pelo simulador. Cada equipamento tem o seu botão específico de comando que controla toda a geração dos tempos de operação, contagem de atividades realizadas e deixa explícito na área selecionada, a próxima operação a ser realizada. A Figura 4.3 mostra o *lay-out* da área de controle dos equipamentos.

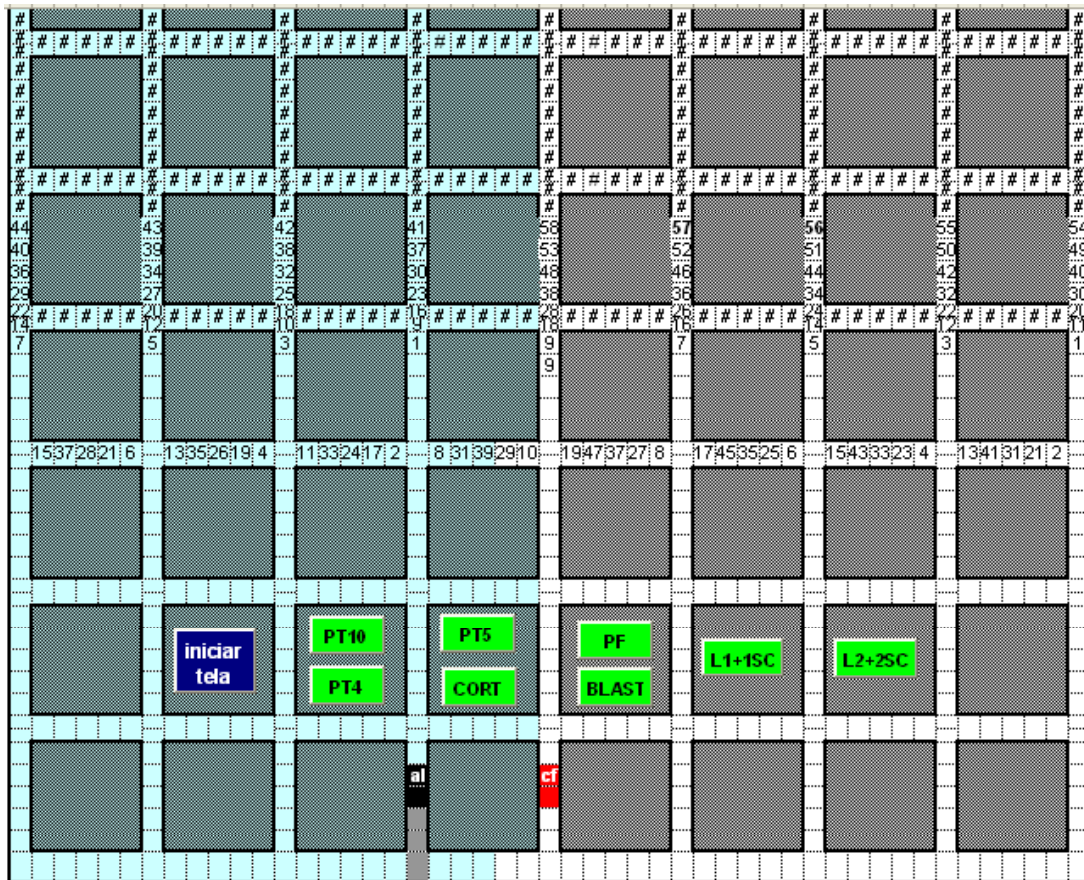


Figura 4.3 Módulo de controle de posicionamento de equipamentos.

PT10, PT5, PT4, CORT, PF, BLA, L1+1SC E L2+2SC são os botões de troca de frente dos equipamentos.

PT10: parafusadora número 10

PT5: parafusadora número 5

PT4: parafusadora número 4

CORT: cortadeira

PF: perfurador de frente

BLA: blaster

L1+1SC: *loader* número 1 com 1 *shuttle car*

L2+2SC: *loader* número 2 com 2 *shuttle cars*

Os símbolos al e cf representam a localização do alimentador da correia transportadora e o centro de força do conjunto mecanizado. Os números representam apenas uma possível orientação para a ordem de lavra, pois podem ser ignorados segundo a vontade do usuário do simulador.

4.4.2 Módulo de controle de contagem dos tempos totais, esperas e produção

Estes três sub-módulos dizem respeito ao acompanhamento dos tempos gerados por simulação, início de uma nova rodada, etc. O primeiro sub-módulo apresentado na Figura 4.4 mostra o somatório dos tempos executados por cada equipamento (A), um contador onde se pode estipular o tempo de turno com o qual se deseja trabalhar (B) e os tempos de simulação dos equipamentos (C).

Os tempos apresentados em cada visor são os próximos valores que serão computados na mudança da frente de serviço. O botão "início simulação" retorna a um tempo inicial, zerando os contadores para uma nova rodada. Existe também um indicador em amarelo que mostra qual o

próximo equipamento a sofrer alteração de posição, visando agilizar o andamento da simulação.

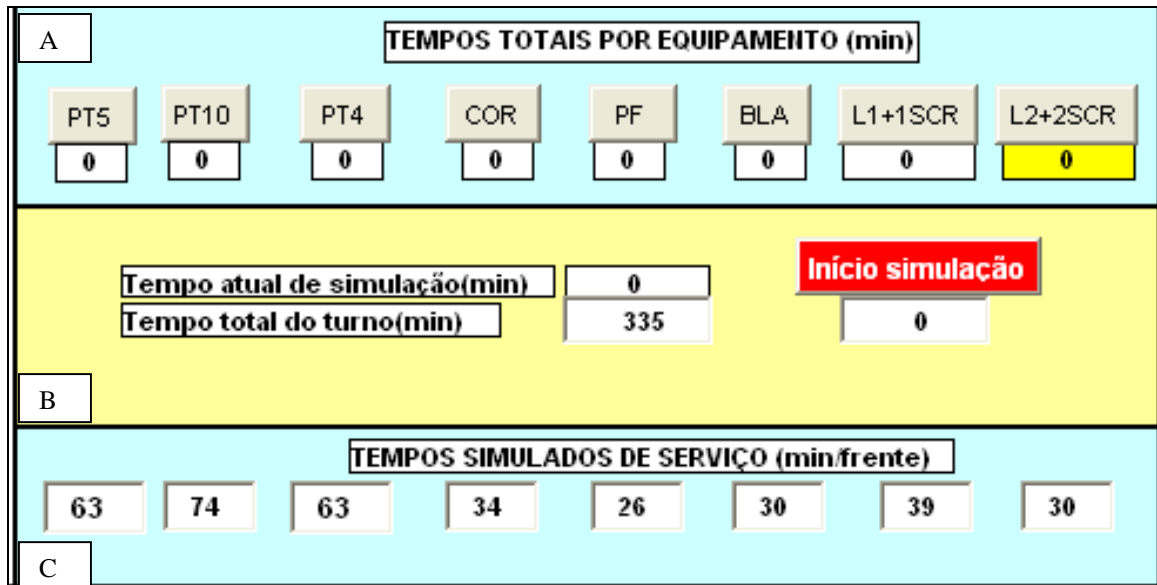


Figura 4.4 Módulo de contagem do tempo de simulação e visualização dos tempos gerados por simulação.

As siglas significam:

PT10: parafusadora de teto número 10

PT4: parafusadora de teto número 4

PT5: parafusadora de teto número 5

COR : cortadeira

PF: perfuratriz de frente

BLA: blaster

L1+1SC : *loader* 1 com 1 *shuttle car*

L2+2SC : *loader* 2 com 2 *shuttle car*

O segundo sub-módulo é o dos tempos de esperas é mostrado na Figura 4.5. Ele tem a função de contabilizar os tempos em que os equipamentos ficam ociosos por falta de frente. Os tempos de ociosidade são gerados automaticamente, apenas sendo necessário escolher o botão correspondente ao equipamento motivador da espera. O contador geral dos equipamentos também se atualiza a cada parada necessária.

TEMPOS DE ESPERA POR EQUIPAMENTO (min)													
PT10		PT4		COR		PF		bla		L1-1SC		L2-2SC	
ELo1	0	ELo1	0	Ept4	0	ECo	0	EPf	0	EBl	0	EBl	0
ELo2	0	ELo2	0	Ept10	0								
ECo	0	ECo	0	EPf	0								
EPf	0	EPf	0	EBl	0								
EBl	0	EBl	0										

Figura 4.5 Módulo de acréscimo de esperas por equipamento.

A letra E nos botões significam esperas por outro equipamento. Por exemplo, a sigla "EPf" significa "espera pela Pf" e assim por diante.

O terceiro sub-módulo apresenta um contador do número de atividades de cada equipamento desempenhadas durante a simulação e um contador de tonelagem transportada ao final da simulação. Os campos Altura da galeria, Largura da galeria e Avanço são mantidos constantes, pois a alteração em um deles afetaria diretamente no tempo de limpeza, que foi obtido em função de um número de viagens constantes, isto é, um volume constante de carvão a ser transportado por frente. Já a Densidade pode ser alterada, visto que não afetaria drasticamente o tempo de execução da limpeza de frente. A Figura 4.6 apresenta o referido módulo.

PT5	PT10	PT4	COR	PF	BLA	1L+1SC	1L+2SC
0	0	0	0	0	0	0	0
Contador de serviços							
Altura da galeria	2		Densidade		Toneladas transportadas		
Largura da galeria	6		2.05		0		
Avanço	3.1		Ton/hora		0		

Figura 4.6 Módulo de contagem de serviços e toneladas transportadas.

4.4.3 Módulo de controle dos tempos individuais dos equipamentos de lavra

A Figura 4.7 mostra a visão geral do módulo de edição dos tempos. Nos cantos superiores se localizam as áreas de edição dos tempos para as parafusadoras de teto. Logo abaixo e ao centro, a área de edição dos tempos de corte, furação, detonação e transporte de minério. A Figura 4.8 mostra uma visão parcial, apresentando a parafusadora 4. Como exemplo, os tempos t_{in} , t_{vent} , t_{ab} , t_d , t_{bit} e t_{hmc} na Figura 4.7 podem ter quaisquer valores dentro dos medidos anteriormente. Há um espaço para número de PI (prumo invertido) e Pc (parafuso curto) por serem instalados, bem como o comprimento utilizado para cada parafuso. A somas de todos estes tempos dará o tempo final de atividade em uma frente de lavra.

Atividade	(min/frente)	Parâmetros da parafusadora 4				Parâmetros da parafusadora 10				Atividade	(min/frente)
t_{in}	0.6	Núm. de PI		Núm. de Pc		Núm. de PI		Núm. de Pc		t_{in}	0.2
t_{vent}	0.2	4	17	4	16					t_{vent}	3.3
t_{ab}	4	Comprimento (m)		Comprimento (m)		Comprimento (m)		Comprimento (m)		t_{ab}	1.9
t_d	4	1.7	1.1	1.8	1.1					t_d	5.4
t_{bit}	1.4	Tempo de colocação (min)		Tempo de colocação (min)		Tempo de colocação (min)		Tempo de colocação (min)		t_{bit}	1.3
t_{hmc}	4.1	28,18	20,576	31,8	21,908					t_{hmc}	7.7
total	14,3	Minutos		Tempo de colocação Total		Minutos				total	19,8
		48,756			53,708						
L1 + 1SC											
Cortadeira			Perfuratriz de Frente			Desmonte			L2 + 2SC		
Atividade	(min/frente)	Atividade	(min/frente)	Atividade	(min/frente)	Atividade	(min/frente)	Atividade	(min/frente)	Atividade	(min/frente)
t_{in}	0	t_{bc}	1.8	t_{in}	1.3	t_{taqua}	0.3	t_{in}	2.9	t_{in}	0
t_{limp}	32.1	t_d	5	t_d	4.2	t_d	4.2	t_{tex}	8.7	t_{limp}	23.1
t_d	5.4	t_{bit}	4.3	t_{bit}	1.2	t_{tac}	3.7	t_{tac}	3.7	t_d	5.4
t_{hmc}	0.6	t_{hmc}	8.2	t_{hmc}	6.3	t_{car}	11	t_{car}	11	t_{hmc}	0.6
Total	38,9	t_{cor}	11	Total	26,1	t_{det}	2.3	t_{det}	2.3	Total	29,5
		t_{lim}	3.5			t_{sob}	0.6	t_{sob}	0.6		
		Total	33,8			t_{ffa}	0.6	t_{ffa}	0.6		
						Total	29,8				

Figura 4.7 Visão geral do módulo de edição dos tempos dos equipamentos.

Atividade		Parâmetros da parafusadora 4	
tin	0.6	Núm. de PI	Núm. de Pc
tvent	0.2	4	17
tab	4	Comprimento (m)	Comprimento (m)
td	4	1.7	1.1
tbit	1.4	Tempo de colocação (min)	Tempo de colocação (min)
thmc	4.1	28,18	20,576
total	14,3	Minutos	Tempo
		48,756	

Figura 4.8 Visão parcial do módulo de edição dos tempos dos equipamentos (parafusadora 4). As abreviações já foram explicitadas no capítulo 3.

4.5 Validação do simulador

Um importante passo na construção do simulador é a sua validação, que por sua vez foi feita em duas etapas diferentes. Uma etapa foi confrontar as produções reais com as simuladas e a segunda etapa foi de reproduzir um turno inteiro seguindo os boletins de operação dos equipamentos de produção. Os tópicos 4.5.1 e 4.5.2 mostram os resultados obtidos.

4.5.1 Reprodução de um turno de trabalho no simulador

Escolheu-se, por exemplo, certo dia de um turno de produção levando em conta a disposição inicial dos equipamentos. É de rotina, cada operador ter seu próprio boletim de atividades, onde se anota as frentes

onde ele exerceu seu trabalho. Assim, tem-se a ordem de ocupação das frentes pelo operador. A metodologia de validação foi seguir fielmente a rota dos equipamentos no simulador, e comparar tanto o número de frentes trabalhadas por cada operador como a produção final, com o resultado real obtido nos boletins. Para tal validação, escolheu-se o dia 27 de agosto de 2002 (Figura 4.9) para servir como parâmetro à simulação. O resumo da simulação pode ser visto na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resultado final a comparação entre simulação e operação real

	Frentes ocupadas			Condição final de turno	
	Real	Simulado		Real	Simulado
PT's	10	10	Sem escorar	12	11
Cortadeira	11	11	Cheias	2	2
PF	12	12	Preparadas	2	2
Limpeza	19	19	Cortadas	1	0
Desmonte	10	13			

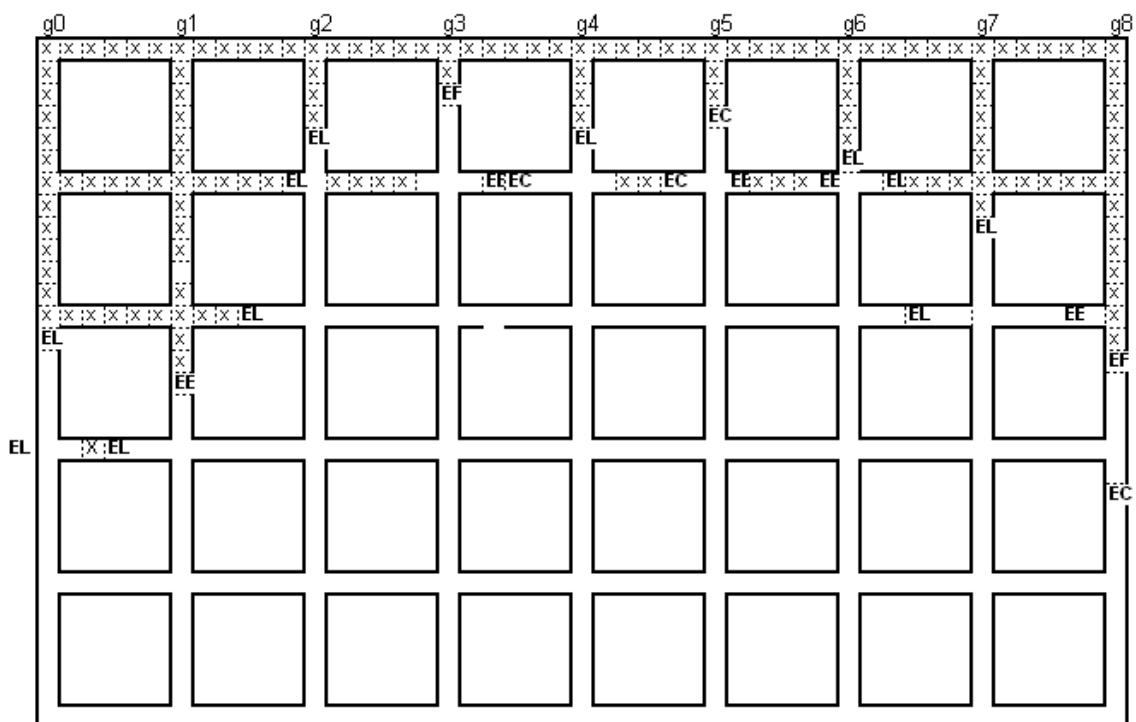


Figura 4.9 Condição inicial do painel no dia 27 de agosto de 2002.

EL: espera limpeza, **EE:** espera escoramento, **EC:** espera corte, **EF:** espera furação, **X:** frentes ainda não lavradas.

A discrepância entre alguns resultados na Tabela 4.3 pode ser explicada principalmente devido à simulação a partir dos tempos médios de ciclo obtidos para cada equipamento. Outro fator pode ser o preenchimento errado dos boletins de equipamentos, onde muitas vezes o operador deixa para completá-lo ao fim do turno, perdendo assim a seqüência exata de ocupação. A reprodução do turno de trabalho foi satisfatória, o suficiente para uma primeira aprovação do simulador.

4.5.2 Comparação entre produção real e simulada

Outra forma de validação é comparar-se a produção média obtida pelo sistema real com a média obtida pelo processo de simulação. Para tal, a mesma configuração de equipamentos deve ser mantida, bem como o padrão de lavra utilizado. Para comparação, se utilizou o mês de

Agosto/2002, os quais geraram a média de 16,2 frentes limpas por turno de produção. A partir de uma condição real de turno, isto é com uma configuração real do estados das frentes de serviço, foram simulados 7 turnos de produção. A Tabela 4.4 mostra os valores simulados obtidos.

Tabela 4.4 Número de frentes limpas simuladas.

15	15	15	17	18	17	17
----	----	----	----	----	----	----

A média destes valores é de 16,3 com um coeficiente de variação de 8%, sendo que o coeficiente dos dados reais é de 19 %. Esta diferença pode ser explicada pelo uso de tempos médios para cada atividade no simulador. Assim, a simulação pode trazer uma resposta mais racional que a praticada efetivamente na mina. Mas de qualquer forma, os valores médios se aproximam muito, para não dizer iguais, o que mais uma vez mostra a coerência do simulador.

Vale ressaltar que o objetivo principal é a validação do simulador utilizando-se o parâmetro frentes transportadas, isto é, a produção final do painel de lavra. Outros parâmetros poderiam ser validados, porém fugiriam do escopo do trabalho. A própria Carbonífera Metropolitana utiliza como parâmetro de funcionalidade do sistema de lavra o número de frentes transportadas.

4.5.3 Justificativa para o modelo de simulador escolhido

Este simulador trabalha com os tempos médios obtidos para cada operação a fim de facilitar o processo de simulação. O processo estocástico ficou descartado por necessitar de trabalho adicional, como a construção de um bom gerador de números aleatórios e testes de aderência de distribuições de probabilidade. Assim se teria um volume trabalho muito

maior para obter-se a produção média por turno, pois seria necessário simular várias vezes com um conjunto de números aleatórios diferentes.

Um outro fator importante é que o volume de dados de operação é pequeno e dificulta a validação e construção de curvas de probabilidade das diversas atividades. Assim haveria a possibilidade de que os valores simulados diferissem dos valores reais operacionais, tornando assim o resultado final um somatório de erros durante o processo de simulação.

4.6 Outras aplicações para o uso do simulador

Além da possibilidade de estimativa inicial de produção para o painel de lavra, o simulador mostrou-se de grande utilidade em outras aplicações, as quais podem ser:

- i. treinamento de pessoal de operação (pela destacada capacidade de visualização das operações de painel que ele proporciona);
- ii. análise quantitativa de configurações (número e organização) de equipamentos;
- iii. reflexos no encadeamento de turnos de trabalho com funções diferentes (preparação x produção);
- iv. impacto de redução abrupta do número de frentes de trabalho disponíveis (por exemplo, na intersecção do painel com falhas, diques, etc...);
- v. visualização da interação física entre equipamentos próximos ou junto aos locais de detonação (a proximidade limita os atuação dos equipamentos);
- vi. ferramenta de suporte para o planejamento de produção e operacional.

A seguir, o capítulo cinco apresentará um exemplo de aplicação do sistema computacional desenvolvido, com algumas variações pertinentes ao estudo.

CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL

5.1 Introdução

O capítulo cinco apresenta algumas aplicações (estudo de caso) do simulador computacional de produção envolvendo a construção de dois modelos simples. Explicitadas as situações escolhidas para a simulação (A) e (B), os resultados são discutidos e apresenta-se uma conclusão sobre as referidas simulações.

5.2 Situações estudadas

Serão exemplificadas duas situações básicas de operação de painel com mudança no esquema de turnos, mas preservação da organização. As situações A, e B de simulação levarão em conta parâmetros do modo de operação do painel de lavra no mês de Agosto de 2002. Cabe ressaltar que há uma divisão do painel de lavra do ponto de vista de operação dos *loaders* onde, por exemplo, o *loader 1*, fica responsável da primeira até a quarta galeria e o *loader 2* responsável pela quinta a nona galeria. No entanto, para fins práticos, a quarta e quinta galerias podem ser ocupadas por ambos equipamento, conforme seja necessário. Tanto na situação real quanto na situação A, o número de operários é de 23 homens, enquanto no caso da situação B passa a ser de 36 homens, na soma dos turnos de trabalho (operários envolvidos somente na produção de carvão).

5.2.1 Situação A

Os equipamentos disponíveis para esta situação são duas parafusadoras de teto, uma cortadeira, uma perfuratriz de face, um *blaster*, dois *loaders* e três *shuttle cars*. Foram adotados dois turnos de trabalhos divididos da seguinte forma:

- Primeiro turno: neste turno de trabalho serão utilizados todos os equipamentos disponíveis, podendo ser caracterizado como um turno de produção de minério.
- Segundo turno: para este turno, se utiliza todos os equipamentos, com exceção do conjunto 1 *loader* / 2 *shuttle cars*. O outro conjunto de *loader/shuttle car* fica responsável apenas pelas limpezas que não puderam ser efetuadas no primeiro turno. Pode ser chamado de turno de preparação, isto é, deixar frentes detonadas e escoradas a serem limpas no próximo turno.

O ordenamento de lavra segue o modelo proposto na Figura 5.1, onde se prioriza o avanço no painel de forma alinhada, para que alguns benefícios discutidos em outros capítulos sejam alcançados. A situação A compreendeu um período de 27 dias de simulação totalizando assim 54 turnos de produção. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.1 a 5.3.

Tabela 5.1 Número médio de frentes trabalhadas por turno na situação A

<i>Turno</i>	<i>Escoradas</i>	<i>Cortes</i>	<i>Furação</i>	<i>Detonação</i>	<i>Limpas</i>
1	9,0	9,1	9,1	9,0	16,7
2	9,0	9,1	9,1	9,2	1,3
Total	18	18,2	18,2	18,2	18

Tabela 5.2 Número de frentes limpas em cada dia na situação A

17	19	20	20	16	17	16	20	20
20	17	16	15	20	19	19	20	16
17	17	19	19	18	18	15	17	20

5.2.2 Situação B

Na situação B de simulação, os equipamentos disponíveis são três parafusadoras de teto, uma cortadeira, uma perfuratriz de face, um *blaster*, dois *loads* e três *shuttle cars*. Foram adotados três turnos de trabalhos divididos da seguinte forma:

- Primeiro turno: neste turno de trabalho são utilizados todos os equipamentos disponíveis (duas PTs), podendo ser caracterizado como um turno de produção de minério.
- Segundo turno: neste turno de trabalho são utilizados todos os equipamentos disponíveis (duas PTs), assim como no primeiro turno, podendo ser caracterizado também como um turno de produção de minério.
- Terceiro turno: este é o turno de preparação, e é adicionada uma outra parafusadora com as mesmas características da parafusadora de teto número 4 (PT4), totalizando três unidades.

A organização da ordem de lavra é a mesma para a situação A, onde se prioriza o avanço no painel de forma alinhada, como discutido em capítulos anteriores. A situação B compreendeu um período de 8 dias de simulação totalizando assim 24 turnos de produção. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.3 e 5. 4.

Tabela 5.3 Número médio de frentes trabalhadas por turno na situação B

Turno	Escoradas	Cortes	Furação	Detonação	Limpas
1	8,0	8,6	8,9	8,5	16,5
2	9,0	9,0	9,0	9,3	9,8
3	9,4	8,9	8,6	9,0	10*
Total	26,4	26,5	26,5	29,9	26,3

* detonadas e escoradas, aguardando limpeza no turno seguinte.

Tabela 5.4 Número de frentes limpas em cada dia na situação B

26	28	28	21	29	28	29	21
----	----	----	----	----	----	----	----

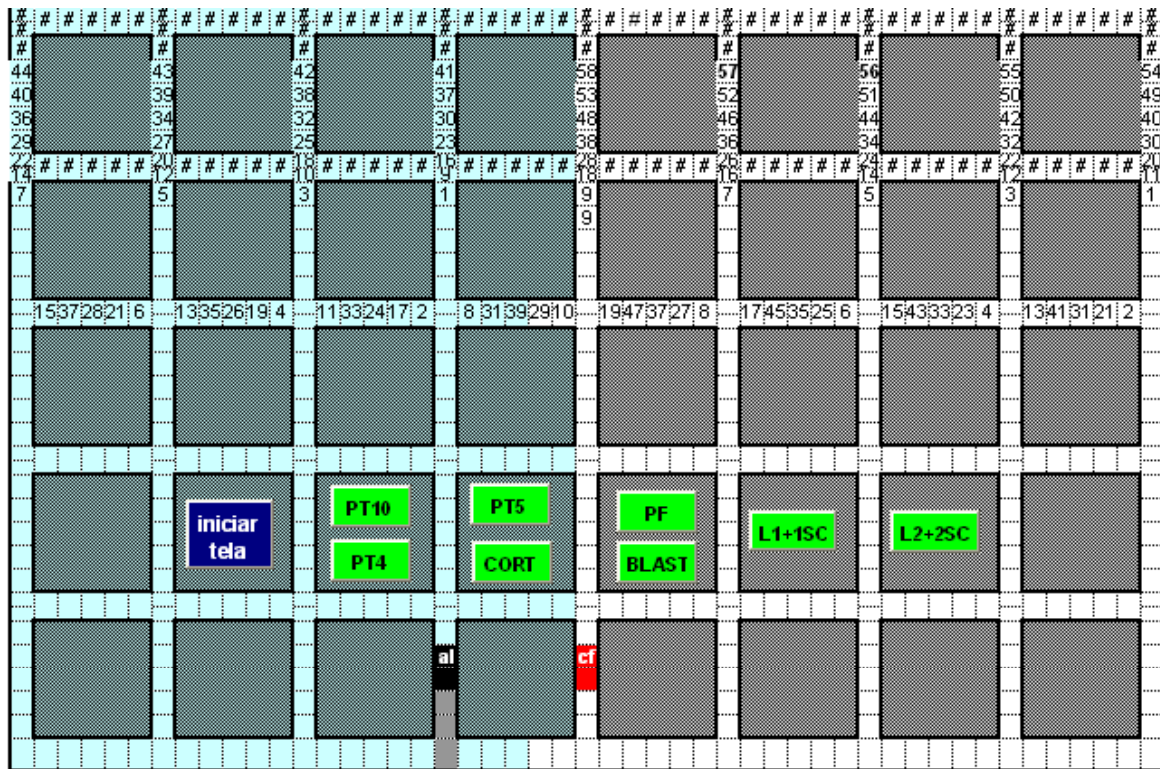


Figura 5.1 Condição inicial de simulação para as Situações A e B. al = alimentador, cf = centro de força. Os números mostram a ordem de limpeza das frentes.

5.3 Análise dos resultados

As informações sobre a produção de minério que se tem em mãos para fim de comparação com os resultados simulados são do mês de Agosto de 2002. A produção média diária no CM-5 foi de 1238 t/dia, (ver figura 5.2), contabilizando uma média de 16,2 frentes limpas durante 22 dias (Tabela 5.5). A meta diária para este conjunto foi estimada em 1373 t/dia ou 18 frentes.

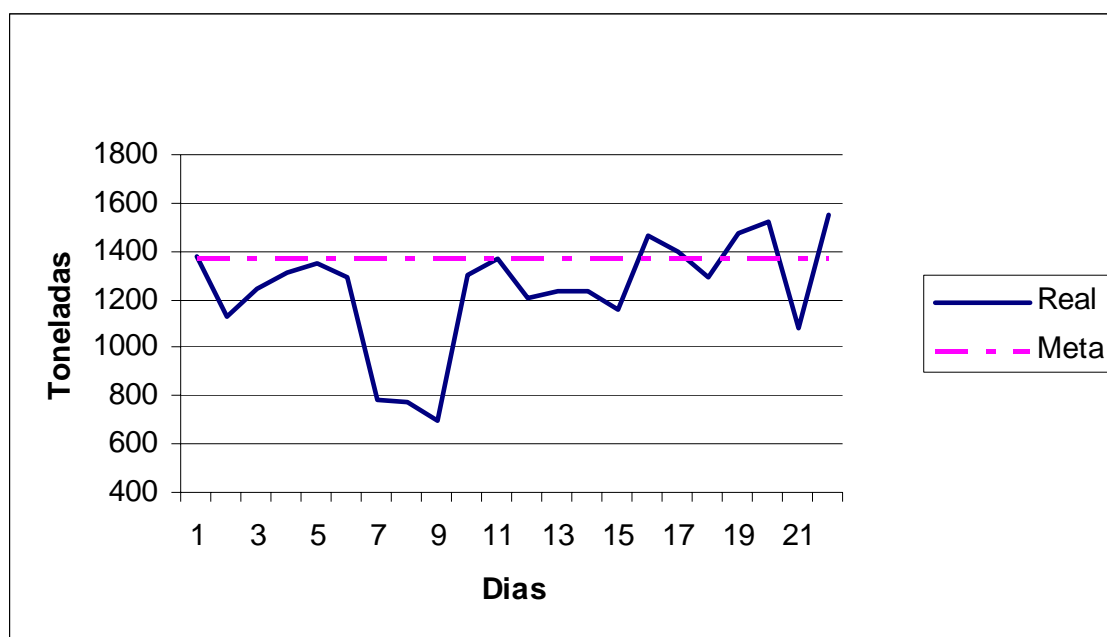


Figura 5.2 Produção diária real do mês de Agosto de 2002 no CM-5.

Tabela 5.5 Número de frentes limpas em cada dia na situação real

18	15	17	17	18	17	10	10	9
17	18	16	16	16	15	19	18	17
19	20	14	20					

Os resultados das simulações para as situações A e B são mostrados nas Figuras 5.3 e 5.4, tendo se como meta para o CM-5 uma produção de 1373 t/dia de minério, como dito anteriormente.

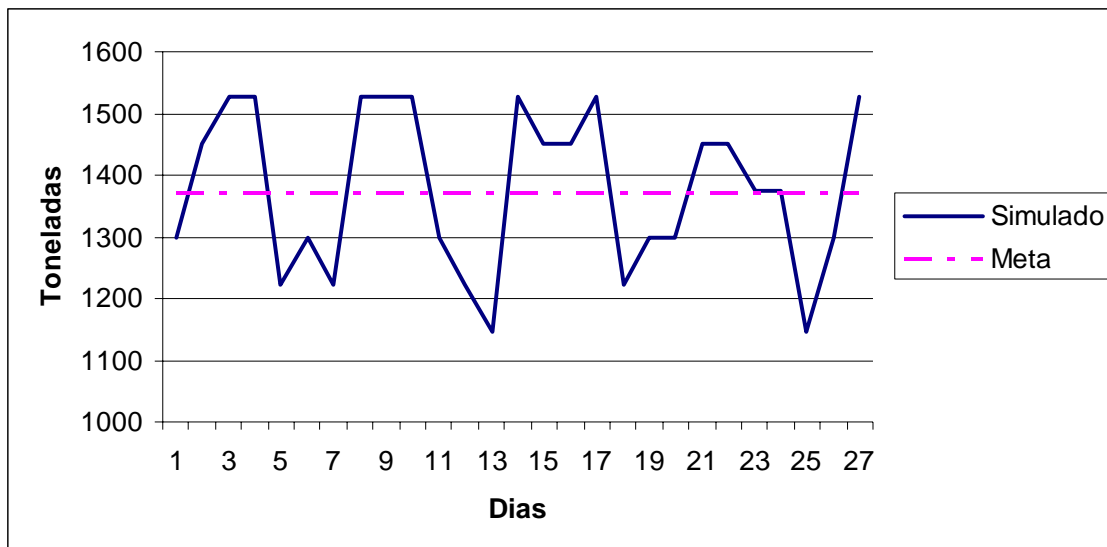


Figura 5.3 Produção diária simulada para a situação A.

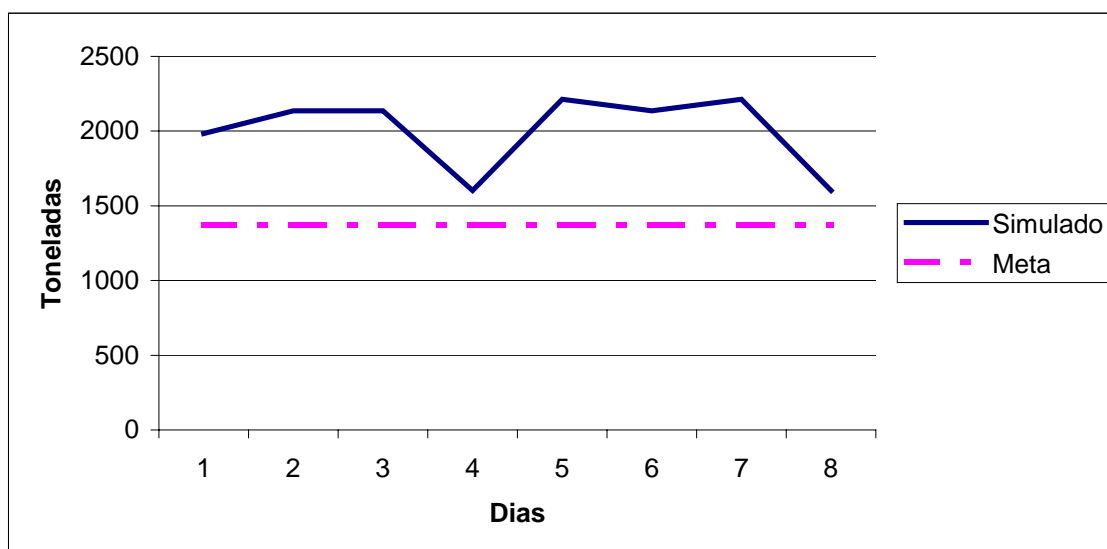


Figura 5.4 Produção diária simulada para a situação B.

Nota-se que tanto na situação A como na situação B, a forma do gráfico repete-se de tempos em tempos. Isto é explicado pela diminuição do número de frentes em certo momento no avanço do painel, onde passam a existir apenas as galerias principais. Assim, logo que tal situação aparece, a produção de minério cai inevitavelmente. Considera-se que para a situação real e situação A, o efetivo de homens diretamente envolvidos na lavra é de 23 homens, e 36 para a situação B. A Tabela 5.6 mostra os resultados

obtidos e os confronta com a média real extraída do boletim estatístico diário da mina.

Tabela 5.6 Comparação entre toneladas médias por dia obtidas

Condição	Média t/h	Média t/h / homem
Real	221	9,6
situação A	245	10,7
situação B	359	10,0

A Tabela 5.7 apresenta uma comparação entre as duas situações principais e a situação real de lavra. Nota-se, que a situação B apresentou um bom acréscimo de produção, embora a produtividade por homem tenha baixado cerca de 7% em relação à situação A (Tabela 5.6).

Tabela 5.7 Comparação entre situações simuladas

Comparações	Diferença %
situação A em relação à real	+ 11
situação B em relação à real	+ 62
situação B em relação à situação A	+ 47

Uma interessante e eficaz maneira de se comparar dados em grupos diferentes é por meio do intervalo de confiança para a medida da diferença de performance de dois sistemas (Law e Kelton, 1991). É um recurso utilizado quando se deseja inferir se duas populações diferem ou não entre si, para um dado nível de significância. O teste de comparação entre as duas situações pode ser de difícil interpretação. Apenas pela análise das médias não se pode concluir exatamente se as duas simulações são equivalentes ou não. A Tabela 5.8 compara o número de frentes limpas por dia da situação real com a simulação da situação A.

Tabela 5.8 Tabela de comparação entre simulações A e real

Produção real	Produção simulada A	Diferença
18	17	1
15	19	-4
17	20	-3
17	20	-3
18	16	2
17	17	0
17	16	1
18	20	-2
16	20	-4
16	20	-4
15	17	-2
19	16	3
18	15	3
17	20	-3
19	19	0
20	19	1
14	20	-6
20	16	4
16	15	1

O $z(n)$ para as diferenças foi de -0,79 e a variância $\text{Var} [z(n)]$ foi de 8,29. Para 90% de confiança, e $n = 19$, a tabela de distribuição para dados t -pareados nos dá o seguinte resultado:

$$t_{18, 95\%} = 1.734$$

Assim o intervalo de confiança passa a ser:

$$-0,79 \pm 1,734 \sqrt{8,29} = \{-5,78; 4,20\}$$

O intervalo de confiança contém o zero, assim se pode concluir que os valores reais e simulados não diferem significativamente um do outro, isto é, o nível de produção de A pode ser considerado o mesmo da situação real.

Neste caso, considerou-se a exclusão dos três piores dias de produção na produção real. Portanto, o novo modo de operação proposto não mostra evidências de que ocasionaria uma produção mais baixa, e ao mesmo tempo, deixaria o painel da lavra mais organizado.

Para a situação B comparada a situação Real, não é preciso o uso da ferramenta utilizada anteriormente, pois claramente os resultados são diferentes e também o modo de operação. A divisão dos turnos é claramente diferente, ocasionando assim uma produção bem maior.

Vale relembrar que o intervalo de confiança para a medida da diferença de performance de dois sistemas tem o propósito de comparar a produção diária entre as situações estudadas.

Na comparação entre as situações real e A, vê-se que o tempo médio por esperas nas duas situações é diferente, o que já era esperado. A Tabela 5.9 abaixo mostra os resultados.

Tabela 5.9 Tempos médios de espera por turno real e simulado (A)

Equipamento	Tempo médio simulado (min/frente)	Tempo médio real (min/frente)
PT 4	0,5	2,1
PT 10	1,2	8,5
Cortadeira	3,1	2,8
Perfuratriz de frente	10,3	11,8
Blaster	10,6	14,2
<i>Loader</i>	4,1	3,1

Pode se então dizer que a situação B (2000 t/dia) foi a que trouxe maior ganho de produção em comparação a situação real (1234 t/dia). Em seguida, a situação A (1373 t/dia) onde se manteve uma ordenação para lavrar o painel.

No próximo capítulo, se apresentaram as impressões finais e as conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

1.1 Introdução

Esse capítulo apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento dessa dissertação e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros envolvendo o tema proposto.

1.2 Conclusões

Do ponto de vista de organização e dos pré-requisitos básicos para se realizar uma simulação, os objetivos foram alcançados. Como primeiro objetivo, iniciou-se com uma coleta de dados dos tempos de operação de cada equipamento e com estes dados pôde-se idealizar um modelo.

O segundo objetivo proposto e alcançado foi o desenvolvimento de um programa computacional, simulando o sistema de produção. O sistema computacional se mostrou satisfatório para o objetivo almejado. O simulador pode rodar em qualquer tipo de máquina que tenha o Microsoft Excel[®]. O tamanho do arquivo executável do simulador é de 340 KB, podendo assim ser transportado até mesmo em um disquete de 3 ½, 1.44 MB. O fato de o simulador ser enquadrado como um modelo determinístico, o torna capaz de retratar com a maior fidelidade possível a variação de produtividade de cada equipamento para o nível de detalhamento desejado.

Para o terceiro objetivo, foi possível avaliar o impacto de possíveis mudanças nas operações do painel de lavra. O sistema computacional

desenvolvido se mostrou bastante útil do ponto de vista de entendimento da ocupação das frentes de lavra pelos equipamentos. As possibilidades de uso de simulação computacional, como se observa em muitas aplicações de simulação na engenharia de produção, começam pelo seu potencial em treinamento de funcionários, já que é possível ver, com razoável aproximação e clareza, a eficácia de uma determinada estratégia de andamento de turno em relação à outra.

A influência do adequado direcionamento dos equipamentos durante o turno pode facilmente ser visto. A abordagem da simulação é a de observar com muito detalhe o andamento das operações no painel de lavra. Pode-se fazer o ajuste do conjunto mecanizado na própria mina em tempo real, dispensando simulação, mas, no entanto, a simulação acelera o processo de ajuste de produção indicando a melhor alternativa.

O simulador pode ser usado tanto para estimativas de períodos muito curtos (p.ex. um turno de produção, apenas) como para períodos de vários dias de produção. No entanto, uma importante limitação quanto ao uso de simulação é que ela sozinha não altera a organização/desorganização do trabalho na mina. Uma nova rotina de operação só será implementada com sucesso se houver o devido treinamento e controle, feito pelo pessoal de operação.

1.3 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros tem se a possibilidade de se aprimorar o simulador nos seguintes tópicos:

- Nova abordagem do uso dos tempos de deslocamentos;
- Estudo da viabilidade de criar uma abordagem estocástica para o sistema de simulação;

- Estudo mais detalhado da etapa de carregamento e transporte;
- Investigar as causas das elevadas paradas por motivos eletromecânicos.

Referências Bibliográficas

Aitken, P., 1996, **Visual basic 4 : kit do explorador**. São Paulo, Berkeley Brasil, 539 p.

Anon., 1955, **The Deep-Mining Book**, Coal Age, September, p. 39-40.

Brunner, D. T., 2001, **Simulation of Underground Mining Operations**, Underground Mining Methods, Eng. Fundamentals and International Case Studies, SME, p. 705-712.

Cummins, A. B. & Given I. A., 1973, **SME Mining Engineering Handbook**, AIME, New York, Volume 1, Sessão 12 e 14.

Farmer, I. 1990, **Room and Pillar Mining**. SME Mining Engineering Handbook, AIME, New York, p. 1681-1700.

Gavira, M. O., 2003, **Simulação Computacional como Ferramenta de Aquisição de Conhecimento**, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 163 p.

Gignac, L. P., 1981, **Simulation of Rock-Handling Systems for Sub-Level Stopping**, Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, SME, New York, p. 693-702.

Hollberg, K.F.; Graehl, D. & Despain, L., 2002, **Application of Simulation Technology to Underground Production**, 2002 SME Annual Meeting, Phoenix, USA, p. 1-8.

Koenigsberg, E. (1958). **Cyclic Queues**. Operation Research Quarterly, p. 22-35.

Kurcewicz, J. A., 2004, **Desmonte com Explosivo em Lavra Subterrânea de Carvão: Avaliação do Desempenho e Utilização de ANFO**, Dissertação de Mestrado. PPGEM/UFRGS, 146 p.

Law, A. M. & Kelton, W. D., 1991, **Simulation Modeling and Analysis**, 2nd. Ed. McGraw-Hill, Singapore, p. 1-12.

Mirabediny, H. & Baafi, E. Y., 1998, **Stochastic Analysis of Dragline Productivity**, APCOM XXVII Conference, London, United Kingdom, p. 631-641.

Miyagi, P. E., 2002, **Introdução a Simulação Discreta**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, SP, p.1-12.

Pereira, S. P., 2001, **Análise de Ciclos de Equipamentos em Mina de Carvão Subterrânea**, Trabalho de conclusão de curso, Porto Alegre, Escola de Engenharia da UFRGS, 88 p.

Ribeiro, J. L. D & Schwengber ten Caten, C., 2001, **Projetos de Experimentos**, Porto Alegre FEENG/UFRGS, 128 p.

Rist, K. (1961). **The Solution of a Transportation Problem by Use of Monte Carlo Technique**. APCOM 1. Tucson: university of Arizona, March.

Salvadoretti, P., 1998, **Simulação de Eventos Discretos de Sistemas Caminhão-Escavadeira na Mineração a Céu-Aberto**, Tese de Doutorado, PPGEM-UFRGS, 94 p.

Santos, M. P., 1999, **Introdução à Simulação Discreta**, Departamento de Matemática Aplicada-Instituto de Matemática e Estatística, UFRJ, 131 p.

Sturgul, J. R., 1998, **Modeling of Complex Surface Rail Haulage at a Mine Complex**, APCOM XXVII Conference, London, United Kingdom, p. 587-593.

Sturgul, J. R., 2000, **Mine Design: Examples Using Simulation**, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. SME, Littleton, CO p. 13-31.

Suboleski, S.C. & Lucas, J.R., 1969. **Simulation of Room and Pillar Face Mining System**. APCOM, Salt Lake City. New York. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 373-384.

Yingling, J. C., 1990, **Cycles and Systems**, SME Mining Engineering Handbook, AIME, New York, p. 783-805.

ANEXO 1

As equações abaixo mostram a relação estabelecida para a etapa de parafusamento de teto quanto ao tempo de instalação dos parafusos curtos e longos em minutos.

As equações para o parafusamento são:

Parafusadora 4:

- Parafusos longos
 $((PI \times m) \times 2.6) + 3.1$ min.
- Parafusos curtos
 $((PC \times m) \times 1.4) + 0.13$ min.

Parafusadora 10:

- Parafusos longos
 $((PI \times m) \times 2.5) + 3.6$ min.
- Parafusos curtos
 $((PC \times m) \times 1.8) + 0.13$ min.

Onde:

PI = número de parafusos longos;

PC = número de parafusos curtos;

m = comprimento de cada tipo de parafuso em metros.

Obs.: a estes tempos são acrescentados os tempos adicionais de cada atividade

Os gráficos que seguem, mostram a relação ente tempo de colocação de parafusos e a quantidade de metros colocados durante a operação.

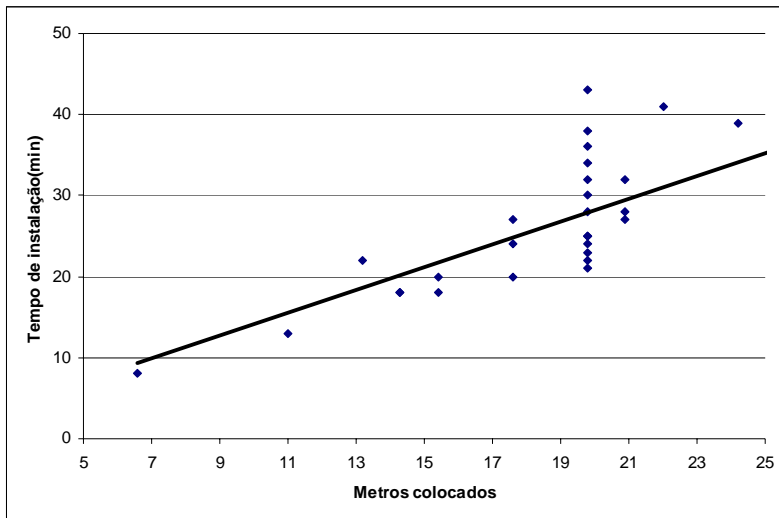


Gráfico1. Relação ente tempo de parafusamento vs. instalação de parafusos para a PT 4.

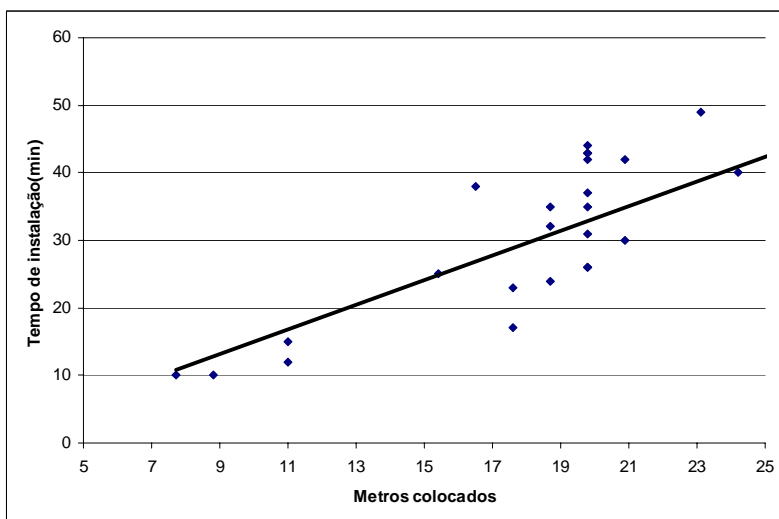


Gráfico2. Relação ente tempo de parafusamento vs. instalação de parafusos para a PT 10.

ANEXO 2

Seguem os gráficos de correlação de tempos de deslocamento de diferentes distâncias para os diversos equipamentos.

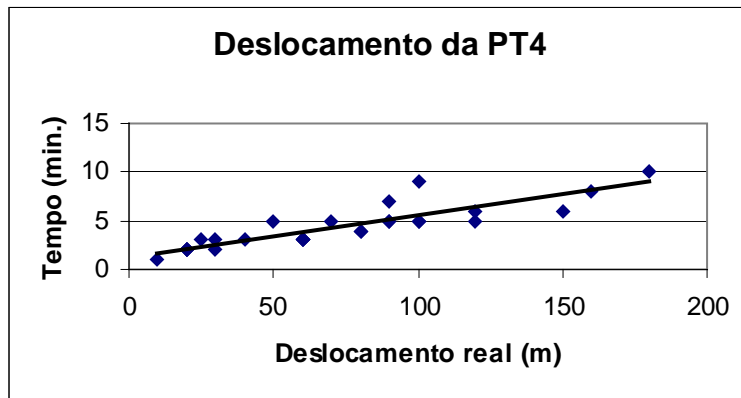


Gráfico1. Deslocamentos da PT4.

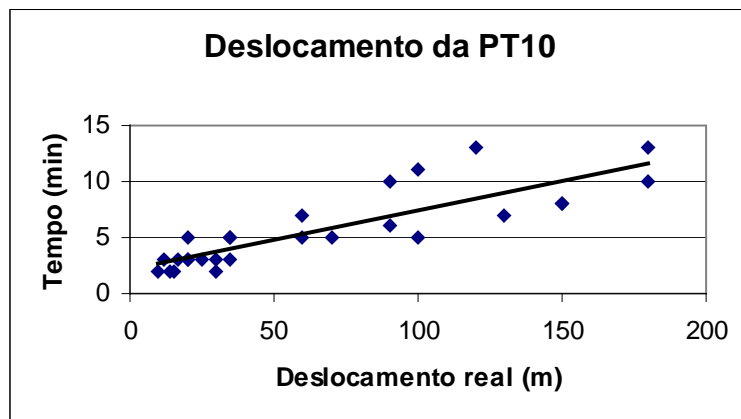


Gráfico2. Deslocamentos da PT10.

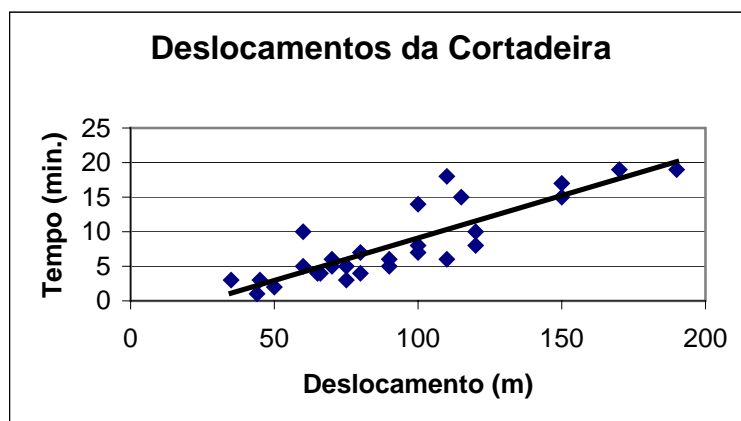


Gráfico3. Deslocamentos da cortadeira.

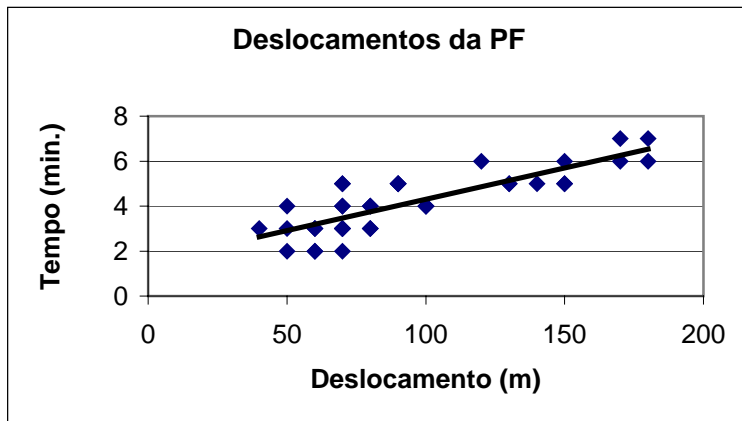


Gráfico4. Deslocamentos da PF.

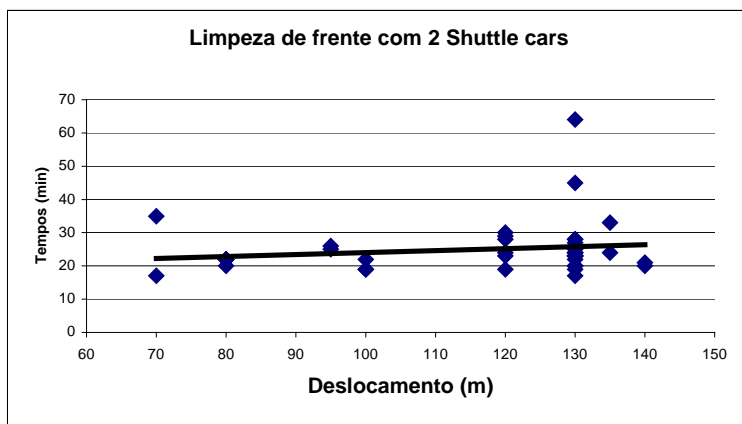


Gráfico5. Transporte com dois *shuttle car*.

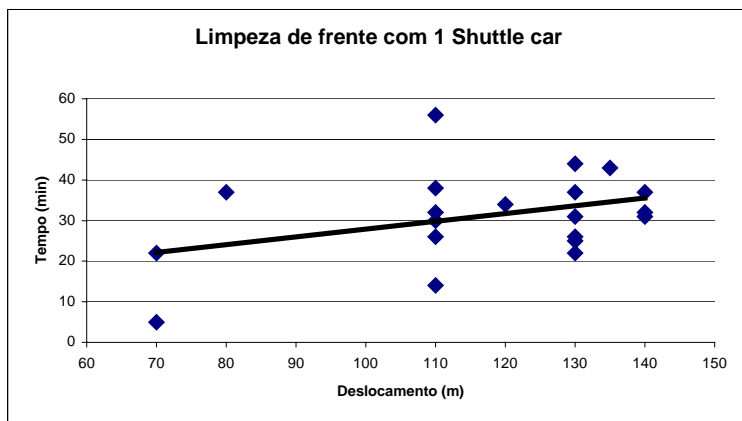


Gráfico6. Transporte com um *shuttle car*.

