2 Revisão Bibliográfica

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica obtida da literatura acadêmica sobre a variedade de modelos de simulação aplicados na indústria de mineração. Está dividido em três seções, sendo a primeira uma apresentação geral de conceitos de simulação e, em seguida, são apresentados modelos de simulação aplicados na mineração. Por último, são apresentados métodos heurísticos utilizados para despacho.

2.1. Simulação

A simulação é uma técnica de pesquisa operacional utilizada para analisar problemas cuja solução analítica é impraticável, seja pela presença de variáveis aleatórias ou por excessiva complexidade do sistema (Pinto, 2007).

Para Pidd (1998), a simulação assim como outras técnicas de pesquisa operacional está baseada na representação matemática ou numérica em modelos do sistema real sem a necessidade de intervenção direta para estudar o sistema.

A simulação, segundo Pedgen *et al.* (1990), é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o objetivo de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

Sturgul (1999), afirma que a simulação permite avaliação rápida e com baixo custo de grande número de problemas sem a necessidade de interferência no sistema sob investigação.

De acordo com Maran e Topuz (1988) *apud* Rodrigues (2006), a simulação pode ser usada para obter medidas de desempenho para um sistema complexo através de experimentos de amostragem em um modelo matemático do sistema.

Panangiotou (1999) afirma que a simulação não resolve problemas diretamente, mas propicia informações sobre como o sistema pode trabalhar quando certos parâmetros são mudados. A operação do modelo pode ser estudada e propriedades a respeito do comportamento real do sistema podem ser deduzidas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Para Silva (2006), a simulação de eventos discretos é uma das mais poderosas ferramentas para modelagem e análise de problemas, freqüentemente utilizada para o planejamento, projeto e controle de sistemas complexos em diversos segmentos, como manufatura, sistemas de manuseio de materiais, engenharia civil, indústria automobilística, transporte, saúde, área militar, serviços, sistemas de comunicação, sistemas de planejamento e projeto de minas e vários sistemas com forte estrutura em filas.

A simulação tem sido largamente utilizada em sistemas de manufatura, controle de materiais e em vários outros sistemas que envolvem formação de fila Sturgul e Li (1997). Segundo Harrel *et al.* (1997) *apud* Silva (2006), provavelmente as indústrias de manufatura foram as maiores usuárias da simulação, principalmente devido à facilidade de uso e à pressão competitiva pela eficiência operacional.

As Tabelas 1 e 2 apresentam algumas aplicações da simulação em operações logísticas complexas apresentadas por Silva (2006) identificando os autores, o objetivo do modelo e o software utilizado.

Tabela 1: Aplicações de simulação em operações logísticas complexas

Operações logísticas complexas		
Autores	**Objetivo do projeto de simulação**	**Software Utilizado**
Barnard e Van Haaften (2000)	Auxiliar na conclusão do projeto conforme cronograma e orçamento estimados	*Extend (Imagine Thet, Inc)*
Standirdge e Hetlne (2000)	Analisar capacidades logísticas	Desenvolvido em Visual *SLAM* e *C*
Diaz e Pérez (2000)	Auxiliar na alocação e na previsão de gargalos	Arena *(Rockwell Software)*

Fonte: Silva (2006)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tabela 2: Aplicações em sistemas de distribuição e transporte

Sistemas de distribuição e transporte		
Autores	**Objetivo do projeto de simulação**	**Software utilizado**
Takakuwa, Takizawa, Ito e Hiraoka (2000)	Avaliar o desempenho de um centro de distribuição não automatizado	Arena (*Rockwell Software*)
Burnett e LeBaron (2001)	Validar o projeto, determinando os recursos necessários e as capacidades operacionais	AutoMod (*Brooks Automation*)
Hugan (2001)	Analisar o tráfego interno de uma planta automotiva	AutoMod *(Brooks Automation)*
Gue e Kang (2001)	Estudar o comportamento e o desempenho de diferentes configurações de filas em estágio	Arena (*Rockwell Software)*
Giacaman, Medel e Tabilo (2002)	Prever o efeito de mudanças na frota de manuseio de matérias na produção mensal	GPSS/H

Fonte: Silva (2006)

2.2.Simulação nas indústrias minerais

Segundo Sturgul (1999), a pesquisa operacional começou a ser utilizada na indústria mineral na década dos 60, como uma importante ferramenta na tomada de decisões, já que os problemas cada vez mais complexos requeriam uma decisão que pudesse ser mais bem avaliada e testada antes de ser efetivamente implementada.

Em um trabalho de pesquisa sobre aplicações de técnicas de pesquisa operacional na mineração Topuz e Duan (1989) *apud* Pinto (1999) apresentam um quadro resumo das principais técnicas aplicadas nesta área, no qual constataram que aplicações envolvendo técnicas de otimização predominavam comparadas àquelas aplicações envolvendo processos estocásticos, como se apresenta na Figura 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

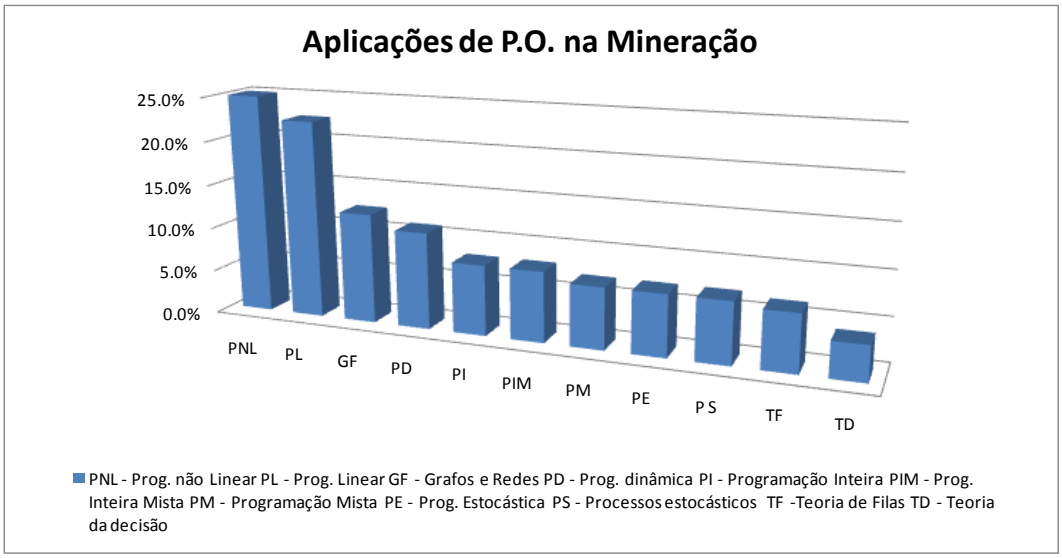

Figura 2: Aplicações de Pesquisa Operacional na Mineração
Fonte: Pinto (1999)

Para Pinto (1999), apesar de o estudo ter mais de 12 anos, o uso de técnicas determinísticas na mineração ainda predomina sobre as técnicas estocásticas, dado que ainda nas grandes empresas problemas de tomada de decisões são solucionados com base no bom senso e em experiências passadas e, apesar de serem consideradas viáveis, não garantem uma decisão ótima sob determinado aspecto.

Segundo Sturgul (1999), as primeiras aplicações na indústria mineral de simulação na mineração remontam à década dos anos 1960 e 1970, nos eventos realizados pela APCOM *(Application of Computers and Operations Research in Mining).*

Sturgul (1999), Pinto (1999), Castro (2006) apresentam uma seqüência cronológica dos trabalhos mais relevantes de simulação na mineração, listados a seguir:

• Rist (1961), descreveu um modelo para determinar o número ótimo de trens no transporte de uma mina subterrânea, usando técnicas de Monte Carlo, segundo Sturgul (1999), este é o primeiro exemplo de aplicação de simulação na mineração.

• Harvey (1964) utilizou e ampliou o modelo Rist (1961).

• Sanford (1965) desenvolveu uma dissertação de mestrado sobre simulação de correias transportadoras.

• Calder e Waring (1965) apresentaram a discussão sobre um pacote computacional desenvolvido para a mina Carol no Canadá.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

• O´Neil e Manula (1967) usaram um modelo de simulação para manuseio de material em mina a céu aberto.

• Manula e Venkataraman (1967) simularam um sistema de carga e transporte em mina a céu aberto.

• Bucklen Suboleski *et al.* (1968) voltaram a discutir a questão da simulação de transporte por trens em minas subterrâneas.

• Cross e Willianson (1969), assumindo que todos os tempos eram determinísticos, construíram um modelo computacional para estudar alocação fixa versus alocação dinâmica de caminhões, em uma mina de cobre dos Estados Unidos.

• Sobeleski e Lucas (1969), criaram o programa denominado Simulator, que simulava operações em minas subterrâneas que operavam no método de câmaras e pilares.

• Bauer e Calder (1973) mostraram as vantagens do uso de GPSS para simular operações em minas a céu aberto.

• Bobilier *et al.* (1976) usaram GPSS para simular transporte por trens em minas subterrâneas.

• Nenonen *et al.* (1981) apresentam um modelo computacional Pá-Caminhão, que busca avaliar o sistema de lavra num centro de mineração de cobre. O modelo inclui computação gráfica e quadros alfanuméricos, que permitem simular os resultados e facilitar a entrada de dados para o usuário.

• Steiker (1982) também usou GPSS para simular sistema de transporte em minas subterrâneas.

• Sturgul e Yi (1987) basearam-se no estudo de Cross e Williamson e construíram um modelo em GPSS, assumindo um processo estocástico, em vez de determinístico, para cálculo dos tempos. Sturgul mostrou como GPSS pode ser usado na simulação de problemas de mineração.

• Sturgul e Harrison (1989) usaram GPSS para simular uma operação de lavra com o objetivo de selecionar métodos de lavra e equipamentos.

• Braga *et al.* (1990) descreveram a aplicação de um modelo de simulação para determinação dos limites de cava final e seqüência de remoção de blocos da mina de fosfato da Arafértil, em Araxá/MG.

• Tavares e Rúbio (1990) descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação usado para predizer o desempenho de recuperação de carvão e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

determinar o teor de cinzas da alimentação em uma planta de beneficiamento da Companhia Riograndense de Mineração.

• Baunach, Grimson e Wagstaff (1991) usando SIMAN e CINEMA, identificaram gargalos de produção em um sistema de manuseio de material, envolvendo seis minas de carvão.

• Rasche e Sturgul (1991) apresentam a aplicação de GPSS, para simular uma mina a céu aberto na Austrália, mostrando a viabilidade do uso de GPSS na construção de modelos computacionais para simulação em minas a céu aberto.

• Vagenas *et al.* (1992) descreveram o desenvolvimento do METAFORA, um simulador para controle de despacho de processos de carregamento e transporte com escavadeiras e caminhões para minas a céu aberto. O programa foi escrito em Turbo Pascal e usava CAD para a visualização do movimento dos caminhões.

• Tsiflakos *et al.* (1992) apresentaram um método interativo para modelagem de sistemas de mineração por simulação que usava modelagem orientada a objetos e visualização gráfica.

• Lanna *et al.* (1992) desenvolveram um modelo de simulação para dimensionamento da frota de caminhões da mina de asbesto Caña Brava, da SAMA, em Goiás.

• Pereira (1992) descreveu um modelo de simulação para estudar o efeito de alocação dinâmica na produtividade, comparado ao do modelo convencional de despacho, na mina de ferro Conceição, da CVRD, em Itabira/MG.

• Faria (1992) desenvolveu um modelo de simulação para avaliar a operação de transporte por caminhões e determinar o custo adicional envolvido nas operações de blendagem, da mina de ferro da Ferteco Mineração, em Minas Gerais.

• Hoare e Willis (1992) usando SIMAN e CINEMA, simularam um sistema de caminhões e britadores, variando o número de caminhões, numa mina de chumbo e zinco no oeste de Austrália.

• Mutagwaba *et al.* (1993) descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação, escrito em C++ , usando técnicas de projeto orientado a objeto, para servir como ferramenta para tomada de decisão em sistemas de transporte de mina.

• Espinoza (1993) relatou os resultados obtidos no desenvolvimento de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

aproximadamente vinte projetos de simulação para a mina de cobre El Teniente, da Codelco, no Chile.

• Mevorach (1994) desenvolveu um simulador para operações de “stackers” e correias transportadoras em uma mina de linhito, na Grécia.

• Bustamante, Giacamen e Barra (1994) desenvolveram um modelo de simulação em GPSS/H e Proof Animation para a usina de fundição de cobre de El Teniente, da Codelco, no Chile. Esse modelo foi uma interessante contribuição, pois usou da simulação discreta para um sistema com variáveis inerentemente contínuas.

• Kolonja e Mutmansky (1994) usaram modelos de simulação e animação para avaliar a eficiência de vários procedimentos de despacho de caminhões em mina a céu aberto.

• Hunt (1994) usou SLAMSYSTEM para simular um sistema de transporte em mina subterrânea do Colorado (EUA).

• Sturgul *et al.* (1995) aplicaram GPSS/H e PROFF Animation em Cabillo e Rawhi de (minas de carvão a céu aberto), Wyoming (EUA), para responder a questões do tipo “o que aconteceria se”, visando ao aumento de produção.

• Pinto (1995) citou, resumidamente, o uso do SIMUL na construção de um modelo para simulação de perfuração numa mina pertencente às Minerações Brasileiras Reunidas (MBR).

• Jacobsen *et al.* (1995) usaram modelos de simulação e animação para determinar o numero ótimo de caminhões, escavadeiras e barcaças no estágio de projeto da mina e para determinar quando um novo caminhão deveria ser acondicionado à frota durante a operação da mina de Lihir (mina de ouro a céu aberto), em Papua, Nova Guiné.

• Sturgul (1995) fez uma abordagem superficial sobre aplicações de simulação e animação da mineração. Nesse trabalho, ele cita a existência de alguns sistemas de simulação e animação, tais como SIMAN, CINEMA e ARENA, GPSS/H e PROFF Animation, SLAMSYSTEMS, MODSIM III / SIMFACTORY / SIMPROCESS e WITNESS. Cita também aplicações desses sistemas na simulação de alguns modelos específicos para mineração.

• Sturgul e Tecsa (1996) usaram modelos de simulação e animação para predizer a produção de uma variedade de combinações de carregadeiras e caminhões com um sistema de despacho em Hibbing (mina de ferro a céu aberto),

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Minnesota (EUA).

• Sturgul, Jacobsen e Tecsa (1996) usaram modelos de simulação e animação para analisar tráfego em duas mãos, num plano inclinado, em The Greens Creek Mine, Alaska.

• Baafi e Ataeepour (1996) usando ARENA, construíram modelos de simulação e animação para comparar a produtividade de um sistema caminhão e escavadeira com e sem despacho.

• Runciam,Vagenas e Newson (1996) usando WITNESS, simularam diversas operações em uma mina subterrânea, superando as expectativas.

• Galiyev (1997) usou simulação de mina para analisar alternativas de combinações tecnológicas e equipamentos, estudarem os melhores trajetos para transporte, locais de escavadeiras, previsão de produção e pesquisar a confiabilidade do equipamento, no Kazaquistão.

• Panagiotou *et al.* (1997), apresentaram um conjunto de programas chamado STRAPAC 2, que foi desenvolvido para assistir aos engenheiros no planejamento e análise de operações de escavadeiras e caminhões em minas a céu aberto. O simulador foi escrito em MS-Visual C ++, enquanto o modelo de simulação foi escrito em GPSS/H.

• Medved *et al*. (1997) descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação escrito em GPSS/H para estudar o sistema de transporte de caminhões, na mina de urânio Zirovski Vrh., na Eslovênia. O modelo foi usado para analisar distintos cenários de padrões de tráfego, utilização dos caminhões e custo operacional.

• Erdem *et al.* (1997) apresentaram uma série de modelos de simulação por computador que foram desenvolvidos como parte de um sistema inteligente para otimizar a operação de escavadeiras de arrasto em minas de carvão a céu aberto.

• Bazante (1997) desenvolveu um modelo para avaliar a eficácia do sistema de escavadeiras e caminhões na mina de asbesto Caña Brava, da SAMA, em Goiás.

• Vargas (1997) descreveu um modelo de simulação discreta para analisar a viabilidade de instalação de uma pilha de homogeneização no projeto de mineração de níquel de Minorco's Lomas, na Venezuela.

• Agioutantis *et al*. (1998) descreveram o desenvolvimento de um simulador para estudar o desempenho de equipamentos, na mina a céu aberto de linhito de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Northem Field, na Grécia. Um pacote de simulação visual chamado Micro Saint também foi usado.

• Em 1998, uma equipe de simulação da empresa Flúor Daniel, coordenada por Rod Hoare, simulou operações na interface mina/planta de beneficiamento e ferrovia/porto e também realizou estudos de expansão de capacidade em várias instalações para estudos de aumento em áreas de armazenagem.

• Konyukh (1998) usou GPSS/H e Proof Animation para escolher a tecnologia do transporte, mais produtiva, e compor o sistema sem gargalos, para minas subterrâneas da Rússia.

• Li (1998) desenvolveu, na China, um ambiente de simulação visual, sem programação para sistemas de mineração.

• Sturgul e Knights (1998) desenvolveram um modelo de simulação, usando linguagem GPSS/H, para verificar estimativas de produção para o primeiro ano de operação da mina do cobre El Abra, no Chile.

• Knights e Muñoz (1998) usaram a linguagem de simulação SLAM-II, para modelar o tempo perdido em filas, em um processo de carregamento e transporte semi-automatizado de uma mina subterrânea.

• Quesada *et al.* (1998) usaram as linguagens de simulação e animação SIMAN e ARENA para modelar a produtividade de LHD's em operações de uma mina subterrânea.

• Ruciman *et al.* (1999) relataram aplicações das ferramentas de simulação WITNESS pelo Lanner Group e Auto Mod pelo Autosimulations Inc., nos Estados Unidos.

• Carvalho e Duarte (1997) usando um simulador da Nordberg, estudaram várias alternativas para operar totalmente a seco a planta de peneiramento e britagem, da Samarco Mineração S.A. Atualmente, a planta está funcionando da maneira prevista, confirmando os resultados da simulação.

Além dos trabalhos acima citados a continuação apresenta-se uma lista de trabalhos de simulação em mineração nos últimos anos:

• Kolonja *et al.* (1993) desenvolveram um modelo de simulação para representar o sistema de despacho de caminhões, com o objetivo de maximizar a produção e melhorar o desempenho do sistema. O modelo descrito considera duas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

técnicas que permitem reduzir o número de replicações necessárias, MCB (Múltiplas comparações com o melhor) e CRN (Números Aleatórios Comuns), reduzindo assim o risco de chegar a conclusões erradas na simulação.

• Alvarenga (1997) desenvolveu um programa para o despacho ótimo de caminhões em uma mineração de ferro a céu aberto, com o objetivo de minimizar o tempo de filas para as frotas de caminhões. No trabalho desenvolvido, foi aplicada uma técnica estocástica de otimização e um Algoritmo Genético com processamento paralelo a um caso real. O problema se define em sugerir qual resulta ser o ponto de basculamento ou carregamento ideal.

• Rodrigues (2006) faz uma análise das diferentes metodologias baseadas em Programação Linear, Dinâmica e em Heurística, que foram implementadas paro despacho de caminhões em minas a céu aberto, com o objetivo de mostrar a eficiência de cada uma sob condições diferentes das operações de lavra, os experimentos realizados mostraram que não se pode concluir pela superioridade de uma metodologia em geral.

• Pinto (1999) desenvolve uma metodologia de análise de cenários de produção em minas a céu aberto, com uso de técnicas de simulação a eventos discretos. A metodologia baseia-se no método das três fases e no uso de Diagramas de Ciclos de Atividades. Um simulador, denominado SIMIN, foi desenvolvido para se adequar à metodologia proposta, sendo utilizado para resolver modelos específicos aplicados à mineração e também modelos genéricos.

• Boulanger *et al.* (2000) descrevem o protótipo de um sistema para o monitoramento remoto de equipamentos via satélite num centro de mineração a céu aberto, com o objetivo de dar solução aos problemas logísticos.

• Çetin (2004) apresenta o estudo do sistema de carga e transporte num centro de mineração a céu aberto. O principal objetivo do presente estudo e realizar uma análise e comparar os métodos heurísticos existentes para o despacho de caminhões, de tal forma que permita achar uma regra que seja possível aplicar num centro de mineração qualquer.

• Pinto e Ramos (2004) descrevem o desenvolvimento de um *Template* no programa Arena, para a simulação de operações de carregamento e transporte em minas a céu aberto. Para testes com dados reais, foi implementado um modelo utilizando-se dados da Mina do Tamanduá da MBR.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

• Sánchez (2005) descreve o desenvolvimento de um modelo de simulação, fazendo uso do software de simulação GPSS-H. O modelo considera um sistema de transporte num centro de mineração subterrâneo e a céu aberto, com o objetivo de dimensionar a frota de equipamentos de carga e transporte que permitam alcançar um custo mínimo no processo da lavra.

• Krause e Musingwini (2007) desenvolveram um modelo de simulação baseado no Modelo de Reparação de Máquina, o qual foi modificado e usado para dimensionar o tamanho de frota de equipamentos de transporte num centro de mineração a céu aberto.

• Pinto (2007) apresenta um algoritmo de despacho de caminhões em minas a céu aberto com o uso da lógica Nebulosa, tendo como objetivo atender simultaneamente às políticas de produtividade e qualidade do sistema de lavra. Os resultados obtidos mostraram que a política que utiliza ambos os critérios é a que gera maior ganho de qualidade e produtividade.

• Ortiz *et al.* (2007) apresentam um estudo para o dimensionamento da frota de equipamentos de carga e transporte num centro de mineração a céu aberto. O presente trabalho desenvolve modelos probabilísticos e determinísticos de simulação.

• Najor e Hagan (2006) analisam a produtividade dos equipamentos de carga, transporte e as horas de operação requeridas no sistema de lavra, para determinar a programação da produção de minério. Os autores descrevem um método baseado na teoria de filas considerando os tempos de carga e deslocamento assim como a capacidade dos equipamentos, de forma que permita adequado dimensionamento das frotas.

Como se pode notar pelos trabalhos descritos acima, a evolução da simulação na mineração foi muito rápida sendo uma das técnicas de Pesquisa Operacional que vem crescendo com a atual modernização. Segundo Pinto (2007), no final da década de 90, diversos autores fizeram uma análise da utilização da simulação em mineração nos vários países e continentes do Planeta. Turner *apud* Pinto (2007) descreveu alguns trabalhos executados na África do Sul onde o uso da simulação segundo o autor é extensivo.

Panagiotou (1999) apresenta um estudo de técnicas de simulação em minas a céu aberto na Europa e Knights e Bonates (1999) *apud* Pinto (2007) analisaram aplicações de simulação na indústria mineral na América do Sul. Pela pesquisa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

realizada pode-se concluir que a difusão da simulação na área da mineração para análise de capacidade, avaliação de impactos de mudanças nos processo, alocação dos equipamentos, determinação de parâmetros das operações para garantir a continuidade da produção entre outras aplicações teve um significativo crescimento nos últimos anos.

Assim, ao mesmo tempo em que foi observado o extensivo uso da simulação em diferentes problemas ligados aos processos de lavra, foi identificado que alguns analistas e usuários de simulação consideraram a simulação como uma simples cópia da realidade ou como um exercício de programação em computador. Por causa desse tipo de pensamento, muitos estudos de simulação têm sido submetidos a verificações e validações insuficientes.

A simulação é uma poderosa ferramenta de avaliação de cursos e ações, mas requer um grande esforço metodológico e um rigoroso estudo para levar a conclusões satisfatórias, Castro (2007).

Com base no exposto acima, será desenvolvido um modelo de simulação para descrever e analisar o processo de Carregamento e Transporte através de uma metodologia para simulação, validação e experimentação que permita obter melhores resultados.

2.3. Aplicação de métodos heurísticos para simular o sistema de despacho

O despacho de caminhões envolve a decisão de definir para qual carregadeira o caminhão livre será enviado (SOUMIS *et al.*,1989 *apud* PINTO, 2007). A alocação de caminhões em minas a céu aberto pode ser estática ou dinâmica. Na alocação estática, os caminhões são fixados a um ponto de carga e a um ponto de descarga deslocando-se apenas entre esses dois pontos durante determinado período de tempo Costa (2005). Na alocação dinâmica, o caminhão para efetuar a carga e/ou descarga é direcionado para um ponto específico, de acordo com critérios previamente estabelecidos (Rodrigues, 2006).

Segundo diferentes autores, entre eles Kolonja *et al* (1993), Gamache (2007), historicamente as minas a céu aberto sempre operaram com alocação estática dos caminhões, mas com o desenvolvimento da tecnologia e a possibilidade de monitoramento e controle pelo computador, a alocação dinâmica

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

vem sendo utilizada em diferentes centros de mineração para atendimento dos objetivos de produção.A utilização da alocação dinâmica requer o uso de um sistema de despacho. Pode-se dizer que os termos “alocação dinâmica” e “despacho” são equivalentes, ou seja, o termo despacho refere-se à alocação dinâmica de caminhões a equipamentos de carga, Pinto (2007).

Segundo Kolonja *et al.* (1993), os sistemas de despacho têm o potencial de melhorar a produtividade dos caminhões e dos equipamentos de carga, gerando conseqüentemente ganhos operacionais pela redução dos tempos de espera e obtenção de outros benefícios, com melhor monitoramento, roteirização ótima e controle de teor. Entretanto, a eficiência no emprego da frota de caminhões e equipamentos de carga depende da estratégia de despacho usada, da complexidade do sistema e de uma série de outras variáveis.

Os sistemas de despacho utilizam critérios estabelecidos, como qualidade (atendimento das restrições de qualidade da usina de beneficiamento), produtividade, menor tempo em fila entre outros. Diversos autores vêm propondo diferentes metodologias para simular o sistema de despacho em minas a céu aberto, Çetin (2004) apresenta uma análise comparativa de metodologias utilizadas por alguns autores para simular este sistema baseado em técnicas heurísticas, conforme as Tabelas 3.

Tabela 3: Modelos de simulação do sistema de despacho

	Cross & Williamson (1969)	**Brake & Chartterjee (1979)**	**Kim & Ibarra (1981)**	**Tu & Hucka (1985)**	**Tan (1992)**
Software	N/A	SIMULA	GASP IV &FORTRAN	SLAM	SIMAN
Animação	N	N	N	N	N
Número de pontos de despacho	1	1	2	Múltiplas	1
Número de regras de despacho	1	3	1	1	9
Manutenção dos equipamentos	N	Y	Y	Y	N
Interatividade	N	Y	N	N	N
Efeitos do despacho	Redução nos custos de operação	Incremento da produtividade em um 3%	Incremento da produtividade em um 10%	-	Incremento da produtividade
Porte da Mina	Grande	Grande	Grande	Médio	Médio
Políticas estudadas	Heurísticas	Heurísticas	Heurísticas	Heurísticas	Heurísticas

Fonte: Çetin (2004)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

Tabela 3: Modelos de simulação do sistema de despacho (Continuação)

	Kolonja (1992)	**Forsman & Vegenas (1992)**	**Temeg et al. (1994)**	**Kolonja et al. (2000)**	**Necmetin (2004)**
Software	SIMAN	Pascal	Fortran	GPSS/H	GPSS/H
Animação	CINEMA	Graphical Display	N	PROOF	PROOF
Número de pontos de despacho	1	1	1	Não considerado	1
Número de regras de despacho	8	3	6	Não considerado	9
Manutenção dos equipamentos	Y	Y	Y	N	Y
Interatividade	N	Y	N	N	N
Efeitos do despacho	Incremento da produtividade em um 4.5%	Incremento da produtividade em um 2%	Incremento da produtividade.	Não considerado	Incremento da produtividade
Porte da Mina	Médio	Grande	Grande	Médio	Médio
Políticas estudadas	Heurísticas	Heurísticas	Heurísticas	Não considerado	Heurísticas

Fonte: Çetin (2004)

De acordo com Alarie e Gamache (2002) e Munirathinam e Yingling (1994) *apud* Rodrigues (2006), existem duas abordagens para simular o sistema de despacho: sistemas que usam heurísticas para tomar decisões de alocação de caminhões e sistemas dirigidos pelo planejamento. Nos sistemas que usam heurísticas, no momento de tomar uma decisão de despacho, o procedimento envolve a escolha de uma regra heurística e os sistemas que fazem uso de um planejamento fazem uso de modelos matemáticos como se mostra no trabalho desenvolvido por Costa *et al.* (2005). Çetin (2004) apresenta uma descrição das regras heurísticas mais comuns para simular o sistema de despacho que serão utilizadas como base para o modelo de simulação a ser desenvolvido, descritas na continuação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

2.3.1. Minimizar os requerimentos de produção das carregadeiras (MSPR)

O objetivo deste critério é atingir as metas de produção que foram determinadas em função de métodos de programação linear ou outras abordagens. Quando se têm metas de produção, esta regra direciona o caminhão àquela frente que apresenta maior desvio em relação à produção programada, levando em consideração a capacidade total dos caminhões em rota. Esta solução é avaliada seguindo a equação (2.1):

$$k : \arg\max\{(TNOW * PO_i)/Tshift - P_i\} \qquad (2.1)$$

onde:

k : Carregadeira à qual o caminhão é direcionado;

$tnow$: Tempo decorrido desde o início da simulação;

$tshift$: Tempo total da simulação;

P_i : Produção atual do equipamento de carga;

PO_i : Produção planejada da frente de lavra onde está alocado o equipamento de carga.

2.3.2. Minimizar os tempos de espera dos caminhões (MSPR)

Este critério direciona o caminhão àquela frente em que irá resultar para o caminhão menor tempo de espera para ser carregado. O objetivo deste critério é maximizar a utilização dos caminhões e os equipamentos de carga. No entanto, quando o número de caminhões no sistema é baixo e não existem tempos de espera, esta regra pode resultar numa sobreutilização de alguns equipamentos de carga e, conseqüentemente, tempos ociosos em outros equipamentos dado que podem existir outros equipamentos de carga que não têm equipamentos em fila no mesmo tempo. Esta política de direcionamento de caminhões é recomendável para minas de grande porte que não possuem metas de produção. Cada um dos parâmetros de controle para determinar o ponto de carregamento é avaliado pela equação (2.2):

$$k : \arg\min_i \{\max\{SR_i - TR_i\},0\} \qquad (2.2)$$

onde:

k : Carregadeira à qual o caminhão é direcionado;

SR_i : Tempo que a carregadeira *i* fica disponível para carregar o caminhão;

TR_i : Tempo que o caminhão fica disponível para ser carregado pela carregadeira *i*.

Quando $SR_i - TR_i$ é maior que zero, significa que existirão tempos de espera dos caminhões nos pontos de carga, sendo estes enviados àqueles pontos de carga que apresentem menor tempo de espera.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

2.3.3. Minimizar os tempos de espera das carregadeiras (MSWT)

Este critério direciona o caminhão para aquela frente que tiver alocado um equipamento de carga que esteja esperando por mais tempo para carregar ou aquele equipamento que vai ser desocupado primeiro. Uma das vantagens deste critério é que ele tende a equilibrar a produção dos equipamentos de carga mais uniformemente e dá resultados mais próximos aos objetivos. Este tipo de critério é recomendado para minas de grande porte. Este critério é avaliado pela equação (2.3):

$$k : \arg\min_i \{\max\{TR_i - SR_i\},0\} \qquad (2.3)$$

onde:

k : Carregadeira à qual o caminhão é direcionado;

SR_i : Tempo que a carregadeira *i* fica disponível para carregar o caminhão;

TR_i : Tempo que o caminhão fica disponível para ser carregado pela carregadeira *i*.

2.3.4. Minimizar os tempos de ciclo dos caminhões (MTCT)

Este critério direciona o caminhão vazio para frente que tiver alocado um equipamento de carga que proporcione um menor tempo de ciclo para os caminhões. O objetivo é maximizar o número de viagens do caminhão num turno de trabalho. Este tempo total de ciclo é em função do: tempo de viagem, tempo de carga e descarga e tempo de espera em fila nos equipamentos de carga, conforme a equação (2.4):

$$k : \arg\min_i \{TCT_i\} \qquad (2.4)$$

onde:

k : Carregadeira à qual o caminhão é direcionado;

TCT_i : Tempo de ciclo do caminhão para a carregadeira *i*.

2.3.5. Minimizar a saturação do equipamento de carga (MSC)

Neste critério, o caminhão é enviado à frente que tiver um equipamento de carga alocado com menor grau de saturação. O objetivo é atribuir os caminhões para os equipamentos de carga nos mesmos intervalos de tempo e manter as

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

carregadeiras operando sem ter que esperar por caminhões. Este grau de saturação está definido como o número de caminhões que foram direcionados e o número de caminhões que serão direcionados para esse determinado ponto de carga, em função da equação (2.5):

$$k : \arg\min_i \{(SR_i - TNOW)/TT_i\} \qquad (2.5)$$

onde:

k : Carregadeira à qual o caminhão é direcionado;

SR_i : Tempo que a carregadeira *i* fica disponível para carregar o caminhão;

$tnow$: Tempo decorrido desde o início da simulação;

TT_i : Tempo médio de viagem do caminhão.

2.3.6.Carregadeira que fez o carregamento primeiro (ELS)

Os caminhões são direcionados àquela frente que se espera será a próxima a ser liberada. Esta regra busca diminuir o tempo de desocupação dos caminhões e prevenir longas filas nos pontos de carga, o que pode desbalancear a produção uma vez que prioriza o envio dos caminhões às frentes que estiverem mais perto. Este critério está dado pela equação (2.6):

$$k : \arg\min_i \{\max\{TR_i, SR_i\}\} \qquad (2.6)$$

k : Carregadeira à qual o caminhão é direcionado;

SR_i : Tempo que a carregadeira *i* fica disponível para carregar o caminhão;

TR_i : Tempo que o caminhão fica disponível para ser carregado pela carregadeira *i*.

2.3.7. Maior tempo de espera (LWS)

Neste critério os caminhões são enviados para aquela frente em que, o equipamento de carga alocado estiver esperando por maior tempo para carregar um caminhão.

O objetivo deste critério é balancear a produção entre as carregadeiras e resulta benéfico para pequenos centros de mineração. Este critério é avaliado pela equação (2.7):

$$k : \arg\max_i \{\max\{TR_i - SR_i\}, 0\} \qquad (2.7)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA

k : Carregadeira à qual o caminhão é direcionado;

SR_i : Tempo que a carregadeira i fica disponível para carregar o caminhão;

TR_i : Tempo que o caminhão fica disponível para ser carregado pela carregadeira i.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0712516/CA