

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M

**HEURÍSTICAS DE SEQUENCIAMENTO PARA RETOMADA DE  
PILHAS DE MINÉRIO EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM**

FABIANO DELLA LIBERA DA SILVA

Dissertação para obtenção de título de  
*Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Produção  
Mineral*

Porto Alegre - RS

2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M

**HEURÍSTICAS DE SEQUENCIAMENTO PARA RETOMADA DE  
PILHAS DE MINÉRIO EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM**

FABIANO DELLA LIBERA DA SILVA

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Produção Mineral.

Porto Alegre - RS

2013

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissionalizante, Especialidade Produção Mineral e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

---

**Prof. Michel José Anzanello, PhD**

Orientador PPGEP / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, PhD (PPGEP/UFRGS)

Prof. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, PhD (PPG3M/UFRGS)

Eng. Márcio de Alcântara Costa, Dr (FEQ/UNICAMP)

---

**Prof. Telmo Roberto Strohaecker, Dr**

Coordenador do PPGE3M / UFRGS

Porto Alegre, Novembro de 2013.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Michel José Anzanello, pela disposição de tempo, conhecimento, paciência, dedicação e preocupação com os resultados do trabalho. Seus conselhos e dicas foram de infinita importância para o alcance dos resultados apresentados.

Aos meus falecidos avós Antônio da Silva e Marcelina Barcelos da Silva que, pela simplicidade dos seus gestos durante suas vidas, puderam me ensinar coisas valiosas que me fazem um vencedor em diversas áreas da minha vida.

A Soraia Neto Barbosa da Silva, minha amada esposa onde, através dos seus braços valentes, pude encontrar apoio e compreensão devido aos momentos de ausência aplicados às minhas tarefas acadêmicas e profissionais.

A todos os que contribuíram de forma direta ou indireta não só com o sucesso na minha carreira acadêmica como também na espiritual, social e profissional.

SILVA, Fabiano D. L. *Heurísticas de Sequenciamento para a Retomada de Pilhas de Minério em Pátios de Estocagem* 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Produção Mineral) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

## RESUMO

Em uma cadeia produtiva de minério, as operações de pátio de estocagem, principalmente as de recuperação de pilhas de minério, exercem um papel fundamental por vincularem os processos de beneficiamento e de transporte. Com esta finalidade, esta dissertação propõe o sequenciamento das pilhas de minério a serem recuperadas através da adaptação de heurísticas trazidas pela literatura. Primeiramente, propõe-se uma heurística de sequenciamento para a retomada de pilhas de minério (entendidas como tarefas a serem sequenciadas) nos seus respectivos pátios através da aplicação de um índice de priorização de pilhas (IP). Tal índice apoia-se em fatores relevantes para as operações de pátios de estocagem, como capacidade das recuperadoras, qualidade e tempo de residência do minério e tempo de deslocamento entre pilhas (setup). A segunda heurística proposta, ATCSM (*Apparent Tardiness Cost with Setups for mineral recovery*), modifica a regra de despacho ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*) com vistas à sua aplicação na retomada de pilhas de minério em pátios de recuperação. O ATCSM apoia-se em fatores tidos como relevantes para as operações de pátios de estocagem, como tempo disponível para o empilhamento de um produto e data de entrega de uma pilha, entre outros. Os métodos propostos foram aplicados em um sistema de recuperação de minério composto por dois pátios, duas máquinas recuperadoras e doze pilhas. As sequências de recuperação geradas pelas heurísticas propostas foram consideradas coerentes por especialistas de pátio de estocagem de uma empresa mineradora.

Palavras-chave: Heurísticas, Sequenciamento, Pátios de estocagem.

SILVA, Fabiano D. L. *Scheduling Heuristics for Recovery of Ore Piles in Stockyards*. Master Thesis (Master of Engineering, Professional Mode, Mineral Production Major) - Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

### ABSTRACT

In the supply chain of ore operations, stockyard operations, mainly the recovery of ore piles, play a fundamental role between beneficiation and transport processes. This thesis proposes new scheduling heuristics for sequencing ore piles recovering order. The first heuristics proposes a pile prioritization index (IP) that relies on relevant factors for stockyards operations, including machines capability, ore quality and residence time, and travel time between piles (setup). With similar purposes, the second heuristics modifies the dispatching rule ATCS (Apparent Tardiness Cost with Setups), yielding the ATCSM (Apparent Tardiness Cost with Setups for mineral recovery). The proposed ATCSM also relies on factors regarded as relevant to stockyard operations, as time available for stacking of a product and piles due date, among others. The proposed methods were applied to an ore recovery system composed of two stockyards, two recovery machines and twelve piles. The recovery sequences generated by both heuristics were considered consistent by experts from a mining company.

Keywords: Heuristics, Scheduling, Stockyards

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1</b> – Função perda de Taguchi .....	23
<b>Figura 2.2</b> - Representação esquemática dos pátios, pilhas e recuperadoras.....	27
<b>Figura 2.3</b> - Alocação das pilhas no pátio às máquinas M1 e M2.....	28
<b>Figura 2.4</b> – Matriz setup com os valores dos tempos ( $S_i$ ) .....	30
<b>Figura 2.5</b> – Representação dos pátios, pilhas e suas massas e recuperadoras.....	33
<b>Figura 2.6</b> – Representação das pilhas e as suas respectivas máquinas.....	34
<b>Figura 3.1</b> – Representação esquemática dos pátios, pilhas e recuperadoras.....	51
<b>Figura 3.2</b> – Alocação das pilhas no pátio às máquinas M1 e M2.....	52
<b>Figura 3.3</b> – Matriz <i>setup</i> com os valores dos tempos ( $S_i$ ).....	54
<b>Figura 3.4</b> – Representação dos pátios, pilhas e suas massas e recuperadoras.....	56
<b>Figura 3.5</b> – Atribuição das pilhas às máquinas.....	57

**LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 2.1</b> – Cálculo do índice de balanceamento de pátio.....	29
<b>Quadro 3.1</b> – Pilhas, produtos, massas estocadas e capacidade das pilhas.....	53

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 2.1</b> – Índice de balanceamento de pátio (IBP) por quadrante.....	35
<b>Tabela 2.2</b> - Teor de ferro das pilhas no pátio.....	35
<b>Tabela 2.3</b> - Índice de qualidade das pilhas nos pátios.....	36
<b>Tabela 2.4</b> – Matriz <i>setup</i> com os valores dos tempos em minutos ( $S_i$ ).....	36
<b>Tabela 2.5</b> – Tempo de residência das pilhas em minutos.....	36
<b>Tabela 2.6</b> – Cálculo do índice de priorização de pilhas.....	37
<b>Tabela 3.1</b> – Pilhas, produtos, massas estocadas e capacidades.....	58
<b>Tabela 3.2</b> – Tempos de estocagem das pilhas.....	58
<b>Tabela 3.3</b> – Coeficientes $w_j$ , $p_j$ e $d_j$ .....	59
<b>Tabela 3.4</b> – Matriz <i>setup</i> com os valores dos tempos em minutos ( $S_i$ ).....	59
<b>Tabela 3.5</b> – Teor de sílica (%SiO <sub>2</sub> ) das pilhas no pátio.....	60
<b>Tabela 3.6</b> – Índice de qualidade das pilhas nos pátios.....	60
<b>Tabela 3.7</b> – Cálculo do índice de classificação das pilhas.....	61

**LISTA DE SIGLAS E NOMENCLATURAS**

**%Fe** - Percentual de ferro

**%P** - Percentual de fósforo

**%SiO<sub>2</sub>** - Percentual de sílica

**$\Sigma mM1$**  - Somatório das massas a serem recuperadas pela máquina M1

**$\Sigma mM1A$**  - Somatório das massas a serem recuperadas pela máquina M1 no pátio A

**ATC** - *Apparent Tardiness Cost*

**ATCS** - *Apparent Tardiness Cost with Setups*

**ATCSM** - *Apparent Tardiness Cost with Setups for mineral recovery*

**BPMJSS** - *Blocking Parallel-Machine Job Shop Scheduling*

**FSP** - *Feasibility Satisfaction Procedure*

**IBP<sub>i</sub>** - Índice de Balanceamento de Pátios para uma determinada pilha

**IFA** - Índice de Falta

**IFO** - Índice de Folga

**IP<sub>i</sub>** - Índice de priorização para uma determinada pilha

**IPI** - Índice de Prioridade

**K** - Coeficiente de perda de Taguchi

**LIE** - Limite inferior de especificação

**LSE** - Limite superior de especificação

**MCP** - Menor Custo de Preparação

**MDE/EDD** - Menor Data de Entrega / *Earliest Due Date*

**MF/LS** - Menor Folga / *Least Slack*

**MFA** - Menor Fila Adiante

**MFD** - Menor Folga Dinâmica

**MS** - *Minimum Slack*

**MTP/SPT** - Menor Tempo de Processamento / *Shortest Processing Time*

**OPBS** - *The Open Pit mine Block Sequencing Problem*

**OQE** - *Overall Quality of Production Effectiveness* (Qualidade Global Efetiva)

**PEPS/FIFO** - Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair / *First In, First Out*

**QI** - Índice de qualidade

**QM<sub>i</sub>** - Quantidade de pilhas a serem alocadas para uma determinada máquina

**RC/CR** - Razão Crítica / *Critical Ratio*

**ROM** - *Run Of Mine* (material da mina que foi lavrado e será beneficiado)

**RP** - Regras de Prioridade

**SLA** - *Service Level Agreement*

**STWH** - *Sliding time window heuristic*

**VPL** - Valor Presente Líquido

**WSPT** - *Weighted Shortest Processing Time*

**CapM<sub>i</sub>** - Capacidade de recuperação (retomada) de uma determinada máquina

**Q<sub>i</sub>** - Índice de qualidade das pilhas

**S<sub>i</sub>** - Tempo de *setup* entre pilhas nos pátios

**T<sub>i</sub>** - Tempo de residência de uma determinada pilha

**n** - Número total de pilhas nos pátios a serem alocadas

**xi** - Valor numérico de um parâmetro de qualidade do minério

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	13
1.2 Justificativas .....	14
1.3 Objetivos .....	14
1.4 Procedimentos Metodológicos .....	15
1.5 Estrutura da Dissertação .....	15
Referências .....	16
<b>2. PRIMEIRO ARTIGO: PROPOSTA DE HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO PARA RETOMADA DE PILHAS DE MINÉRIO EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM.....</b>	<b>17</b>
2.1 Introdução .....	18
2.2 Fundamentação Teórica.....	19
2.3 Método.....	26
2.4 Aplicação da sistemática em um sistema de recuperação de minério .....	31
2.5 Conclusão.....	37
Referências .....	39
<b>3. SEGUNDO ARTIGO: MODIFICAÇÃO DA HEURÍSTICA ATCS PARA RETOMADA DE PILHAS DE MINÉRIO EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM .....</b>	<b>41</b>
3.1 Introdução .....	42
3.2 Fundamentação teórica .....	43
3.3 Método.....	50
3.4 Aplicação a um sistema de recuperação de minério.....	56
3.5 Conclusão.....	62
Referências .....	63
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
4.1 Conclusões .....	65
4.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	65

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações Iniciais**

Os processos de pátios de estocagem de minério são de grande importância para a cadeia produtiva da mineração, visto que estabelecem um vínculo entre os processos de beneficiamento e carregamento de vagões. Concluído o processo de beneficiamento do minério, os produtos são direcionados através de sistemas de correias transportadoras até aos pátios de estocagem, os quais são subdivididos em pilhas com a finalidade de permitir o desaguamento parcial do minério (uma vez que os produtos são empilhados ainda úmidos devido à adição de água ao processo de beneficiamento, além de estarem expostos às precipitações pluviométricas e outras intempéries). Além da função de desaguamento, o estoque contribui ativamente na absorção das variações de demanda no transporte e na produção, reduzindo possíveis desvios na qualidade.

Uma definição eficiente acerca da sequência adequada de retomada das pilhas no pátio viabiliza redução nos custos operacionais e desvios de qualidade no minério, os quais afetam negativamente os processos da mina. Por exemplo, o carregamento de minério com um baixo tempo de residência no pátio (e, por consequência, com umidade elevada) faz com que o minério grude nas paredes dos vagões, demandando mais tempo e recursos para a descarga, além de potencializar acidentes com descarrilamentos de trem.

A sequência de recuperação das pilhas depende de diversos fatores, como capacidade das máquinas recuperadoras, tempo de permanência das pilhas nos pátios (tempo de residência), data de entrega e demanda dos produtos, dentre outros. Dentro deste contexto, a programação de tarefas (sequenciamento) é um processo de organização da ordem de execução de tarefas, fazendo com que sejam respeitadas restrições físicas do sistema em análise e minimizadas funções objetivo pertinentes a cada sistema, dentre as quais se destaca a minimização do atraso das tarefas frente a uma data de entrega (Morton e Pinedo, 1993; Pinedo, 2008). Sistemáticas de sequenciamento são facilmente adaptáveis a diversas situações práticas, o que inclui o sistema de recuperação de pilhas de minério.

### **1.2 Justificativas**

A definição da sequência de recuperação de pilhas de minério em pátios de estocagem é, em sua maioria, baseada em preceitos empíricos e métodos subjetivos. Tal definição torna-se complexa pela existência de uma série de fatores a serem considerados simultaneamente na ordem de recuperação, os quais buscam assegurar a qualidade do minério e visam à redução

de problemas nos processos de transporte do minério. A inexistência de uma ferramenta estruturada para definição da ordem de recuperação de pilhas de minério justifica, no aspecto prático, o desenvolvimento de abordagens com vistas à definição de uma sequência apropriada pra tal fim. A adoção de uma sequência adequada para a recuperação das pilhas de minério em pátios de estocagem permite reduzir custos operacionais e desvios de qualidade, além de minimizar problemas operacionais relativos ao manuseio do minério. Além disso, permite a uniformização da ordem de retirada, reduzindo a influência de fatores subjetivos associados à experiência do decisor.

O trabalho também encontra justificativa em termos acadêmicos, visto que não foram encontradas na literatura métodos para sequenciamento que abordassem os diversos fatores pertinentes ao contexto da mineração. Tais fatores incluem capacidade das máquinas recuperadoras, tempo disponível para o empilhamento de um produto, demanda dos produtos nos pátios, tempo de recuperação, data de entrega e tempo de *setup*, entre outros.

### 1.3 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação consiste no desenvolvimento de heurísticas de sequenciamento com vistas à retomada de pilhas de minério em pátios de estocagem.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Propor uma nova heurística baseada em índice de priorização para sequenciamento em pátios de estocagem sujeita a fatores pertinentes ao contexto de recuperação de pilhas de minério;
- b) Propor uma adaptação da regra ATCS de Lee e Pinedo (1997) através da inclusão de fatores pertinentes ao contexto de recuperação de pilhas de minério;
- c) Promover a introdução do tema sequenciamento na mineração, particularmente em sistemas de recuperação de minério em pátios de estocagem, tendo em vista a carência de abordagens estruturadas nesta área;
- d) Aplicar as heurísticas propostas em um cenário real de recuperação de pilhas de minério.

#### **1.4 Procedimentos Metodológicos**

A pesquisa bibliográfica tem por finalidade levantar a fundamentação teórica com relação ao tema abordado. Para tanto, foram levantadas publicações de periódicos nacionais e internacionais, bem como livros de autores reconhecidos na área de programação de tarefas, dentre os quais se destacam Pinedo (2008) e Morton e Pentico (1993).

Para consecução de seus objetivos, as etapas propostas no primeiro artigo inicialmente avaliam a capacidade das máquinas e o número de pilhas disponíveis nos pátios para serem recuperadas. As pilhas são então atribuídas às máquinas levando-se em conta as suas capacidades. Na sequência, levantam-se os fatores que impactam na ordem de recuperação, os quais incluem a qualidade de cada pilha avaliada através da função perda de Taguchi, e a matriz de setup contemplando os tempos de deslocamento das máquinas recuperadoras entre as pilhas. Por fim, estima-se o índice de priorização de recuperação de cada pilha (IP), o qual estabelece a sequência das pilhas a serem recolhidas.

O segundo artigo, onde se propõe a regra ATCSM, aloca inicialmente as pilhas a serem recuperadas às máquinas, de acordo com suas capacidades. Na sequência, são calculados os tempos de estocagem de cada pilha e a demanda relativa do produto a ser expedido. Em seguida, gera-se uma matriz de setup onde são contemplados os tempos de trânsito da recuperadora entre as pilhas e o índice de qualidade das pilhas com base na função perda de Taguchi. Finalmente, o índice de ordenamento das pilhas gerado pelo ATCSM,  $I_j$ , define, para cada uma das máquinas, a sequência de recuperação das pilhas no pátio.

#### **1.5 Estrutura da Dissertação**

O trabalho proposto está estruturado em quatro capítulos. O primeiro capítulo traz uma abordagem inicial do tema, sua importância, a contribuição tanto do ponto de vista acadêmica quanto prática, os objetivos e suas justificativas, o método de trabalho e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentado o primeiro artigo da dissertação, o qual propõe uma heurística de sequenciamento para a retomada de pilhas de minério em pátios de estocagem através da aplicação de um índice de priorização de pilhas (IP). Tal índice apoia-se em fatores importantes para as operações de pátios de estocagem, como capacidade das

máquinas recuperadoras, qualidade do minério, tempo de residência e tempo de deslocamento das recuperadoras entre pilhas (*setup*).

Com objetivos semelhantes, é apresentado no terceiro capítulo o segundo artigo da dissertação, o qual apresenta uma versão modificada da heurística de sequenciamento ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*) de Lee e Pinedo (1997) com vistas à sua aplicação na retomada de pilhas de minério em pátios de recuperação. Para tanto, é calculado um índice de ordenamento de pilhas apoiando-se em fatores importantes para as operações de pátios de estocagem, como tempo disponível para o empilhamento de um produto, demanda relativa, tempo de recuperação da pilha, data de entrega, tempo de deslocamento das recuperadoras entre pilhas (*setup*) e índice de qualidade.

O quarto capítulo apresenta as considerações finais da dissertação, bem como oportunidades de pesquisas futuras.

### **Referências**

LEE, Y. H., BRASKARAN, K. and PINEDO, M. **A heuristic to minimize the Total Weighted Tardiness with Sequence-dependent Setups**, IIE Transactions (29), pp. 45-52 (1997).

MORTON, T. E. & PENTICO, D. W. **Heuristic scheduling systems: with applications to production systems and project management**. New York: John Wiley & Sons 1993.

PINEDO, M. L. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems**. New York: Springer 2008.

## 2. PRIMEIRO ARTIGO

# PROPOSTA DE HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO PARA RETOMADA DE PILHAS DE MINÉRIO EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM

### Resumo

Este artigo propõe uma heurística de sequenciamento para a retomada de pilhas de minério (entendidas como tarefas a serem sequenciadas) nos seus respectivos pátios baseada em índice de priorização de pilhas (IP). Tal índice apoia-se em fatores importantes para as operações de pátios de estocagem, como capacidade das recuperadoras (máquinas), qualidade do minério, tempo de residência e tempo de deslocamento das recuperadoras entre pilhas (*setup*). O método proposto foi aplicado em dois pátios, duas máquinas recuperadoras e doze pilhas; a sequência de recuperação sugerida pelo método foi considerada coerente por especialistas de processo da empresa mineradora.

**Palavras-chaves:** Heurística; Sequenciamento; Pátios de estocagem.

### Abstract

*This work aims to propose a heuristic for sequencing reclaiming iron ore piles (seen as tasks to be sequenced) in their respective stockyard by applying a pile prioritization index (IP). This index rely on relevant factors to the stockyard operation, including capacity of reclaimers (machines), ore quality, time of iron ore residence, and travel time of reclaimers between piles (setup). The proposed heuristic yielded satisfactory results when assessed by process experts when applied to a real pile reclaiming scenario.*

**Keywords:** *Heuristics; Scheduling; Stockyards*

## 2.1. Introdução

Dentre os diversos processos inseridos no contexto produtivo de uma mina, pode-se destacar o processo de estocagem, o qual estabelece um vínculo entre os processos de beneficiamento e carregamento de vagões (ou seja, é o último processo do minério na mina antes do seu transporte para seu próximo estágio na cadeia produtiva).

Para a redução dos custos operacionais e desvios de qualidade no minério, os quais afetam negativamente não só processos na mina como também processos subsequentes, é importante que haja uma eficiente definição acerca da sequência de retomada das pilhas no pátio. Tal sequência de recuperação depende de uma série de fatores, como capacidade das máquinas e tempo de permanência da pilha no pátio, os quais acabam impactando significativamente nos processos subsequentes. Por exemplo, o carregamento de minério com um baixo tempo de residência no pátio (e, por consequência, elevada umidade) faz com que o minério grude nas paredes dos vagões, demandando mais tempo e recursos para a descarga.

Este artigo propõe uma heurística de sequenciamento baseada em um índice de priorização de pilhas (IP) a serem recuperadas com base em fatores relevantes para o processo de carregamento, os quais incluem a capacidade das máquinas recuperadoras, qualidade do minério a ser carregado e transportado e tempo de deslocamento entre pilhas. Para tanto, a heurística proposta inicialmente avalia a capacidade das máquinas e o número de pilhas a serem recuperadas. Em seguida, as pilhas são atribuídas às máquinas de acordo com suas capacidades. Na sequência, gera-se um índice de priorização de recuperação de cada pilha (que estabelece a sequência das pilhas a serem recuperadas), o qual inicia pelo cálculo do índice de qualidade de cada pilha ( $Q_i$ ). Para cada uma das pilhas, deriva-se um critério (parâmetro) de qualidade e, através da aplicação do fator perda de Taguchi, calcula-se o OQE - *Overall Quality of Production Effectiveness* (Qualidade Global Efetiva), onde cada pilha

recebe uma nota proporcional à sua qualidade. Na sequência, gera-se uma matriz de setup contemplando os tempos de trânsito da recuperadora entre as pilhas; tal matriz também comporta restrições físicas e dificuldade de locomoção das máquinas recuperadoras entre as pilhas a serem recolhidas. O índice obtido, IP, determina a sequência de recuperação das pilhas.

A principal contribuição deste artigo está na proposição de um índice original de priorização de recuperação de pilha, o qual apoia-se em fatores relevantes ao processo de recuperação em cenários de mineração. Outra contribuição está no desenvolvimento de uma sistemática para balanceamento dos pátios: tendo em vista que uma mesma máquina pode atuar em dois pátios, é importante que haja um equilíbrio de massa nos pátios.

O presente artigo está estruturado como segue. Na seção 2 é apresentada a fundamentação teórica de sequenciamento, sua importância e impacto na produtividade dos sistemas produtivos, alguns exemplos de sua aplicação e as variáveis importantes que irão compor o IP. A seção 3 detalha o método proposto para sequenciamento de recuperação de pilhas, ao passo que na seção 4 são apresentados os resultados do método utilizando-se dados reais de uma mina. A seção 5 traz as considerações finais.

## **2.2. Fundamentação teórica**

### **2.2.1 Conceitos básicos de sequenciamento**

Davis *et al.* (2001) e Monks (1987) definem sequenciamento como a determinação das máquinas ou centros de trabalho a serem utilizados no processamento de uma determinada tarefa. Técnicas de sequenciamento são bastante difundidas em organizações industriais, sendo aplicadas no apoio aos processos decisórios através da alocação de recursos e tarefas. Além disso, tais técnicas permitem definir uma ordem apropriada para execução de tarefas de acordo com restrições específicas.

Técnicas de sequenciamento impactam significativamente na produtividade, visto que atuam na minimização do tempo de execução das tarefas, nos custos envolvidos neste processo e no fornecimento de informações acerca dos processos produtivos. De acordo com Pinedo (2008), um problema de sequenciamento pode ser descrito no formato  $\alpha | \beta | \gamma$ , onde  $\alpha$  descreve o ambiente da máquina, o campo  $\beta$  fornece detalhes de características de processamento e as restrições, e o campo  $\gamma$  descreve o objetivo a ser otimizado.

Para Reid e Sanders (2005), uma máquina ou centro de trabalho necessita de Regras de Prioridade (RP) quando existem várias tarefas aguardando processamento. Para aplicação simplificada das RP com vistas ao sequenciamento de tarefas, pressupõe-se que não existe variabilidade no tempo de preparação das máquinas nem no tempo de execução da tarefa. Os mesmos autores colocam que as RP são classificadas como locais ou globais: A) RP local estabelece as prioridades baseando-se apenas nas tarefas que estão esperando naquele centro de trabalho específico; PEPS/FIFO (Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair / *First In, First Out*) e MTP/SPT (Menor Tempo de Processamento / *Shortest Processing Time*) são exemplos de RP locais; e B) RP global definem as regras de acordo com fatores como a carga de trabalho programada nas demais estações de trabalho pelas quais a tarefa deve ser processada.

As RP mais comumente reportadas pela literatura, de acordo com Monks (1987), Gaither e Frazier (2002), Tubino (2007) e Lustosa *et al.* (2008), são: PEPS/FIFO, MTP/SPT, MDE/EDD (Menor Data de Entrega / *Earliest Due Date*), IFA (Índice de Falta), IFO (Índice de Folga), IPI (Índice de Prioridade), MF/LS (Menor Folga / *Least Slack*), MFD (Menor Folga Dinâmica), MFA (Menor Fila Adiante), RC/CR (Razão Crítica / *Critical Ratio*), MCP (Menor Custo de Preparação) e Regra de Johnson.

Sistemáticas para sequenciamento de tarefas encontram vasta aplicação em diversos setores produtivos, incluindo cenários de extração em mina. O sequenciamento de bloco em mina a

céu aberto – OPBS (*The open pit mine block sequencing problem*), abordado por Cullenbine e Newman (2011), define um cronograma de produção de tempo discreto que maximiza o valor presente líquido (VPL) do corpo de minério extraído de uma mina. O OPBS soluciona um problema de programação inteira que discretiza o volume da mina em blocos, impondo restrições de precedência entre tais blocos e limitando o consumo de recursos em cada período de tempo; a formulação gerada foi resolvida através de uma heurística de tempo deslizante - STWH (*Sliding time window heuristic*). Segundo Cullenbine e Newman (2011), a resolução de uma programação inteira envolvendo blocos de mina é extremamente complicada em função da enorme quantidade de blocos, na ordem de  $10^4$  blocos, e por conta do horizonte de tempo, o qual que pode ter 20 ou mais períodos.

A aplicação do sequenciamento em setores de logística (extensível a cenários de mineração) também é muito reportada pela literatura. Em Liu e Kosan (2009), foi proposto um método denominado “*blocking parallel-machine job shop scheduling*” (BPMJSS) para o sequenciamento de trens em um ambiente *job shop*; tal abordagem considera as viagens dos trens como *Jobs*, as quais são sequenciadas em vias no formato *single-track* (linha singela) como em um ambiente de máquina única. Com propósitos semelhantes, Liu e Kosan (2009), propuseram a heurística “*feasibility satisfaction procedure*” (FSP) com vistas à obtenção do sequenciamento viável do problema BPMJSS, onde foi incluída uma variável de custo ao modelo original.

Em sequenciamento aplicado à mineração, procura-se ainda determinar a sequência ideal em que o material deve ser lavrado durante a vida útil de uma mina a fim de maximizar o valor presente líquido de suas operações. Com esta finalidade, Bley *et al* (2010) desenvolveram uma formulação de programação inteira utilizando restrições de precedência e de produção identificando variáveis que podem ser resolvidas antes da otimização, reduzindo significativamente o número de variáveis na formulação do problema e, conseqüentemente,

nos requisitos de cálculo e processamento computacional. Semelhantemente, Boland *et al* (2009) sustentam que uma sequência adequada de lavra de blocos discretizados de uma mina traz ganhos significativos nas esferas de planejamento, programação da produção, otimização de processos, garantia da qualidade, sustentabilidade do processo de lavra e também na redução de custos em todo o processo da mina.

### **2.2.2 Critérios relevantes para o sequenciamento em pátios de recuperação de minério**

No processo produtivo de uma mina, a ocorrência de problemas nos processos de beneficiamento, estocagem e transporte, dentre outros, impactam significativamente no volume estocado. De tal forma, é importante a escolha de critérios adequados para sequenciamento das pilhas, gerando melhor aproveitamento dos recursos produtivos, níveis adequados na quantidade de minério nos pátios e aumento da taxa de retirada dos estoques. Alguns critérios relevantes para tal fim são detalhados na sequência.

#### **2.2.2.1 Qualidade do minério**

A qualidade do produto no contexto da mineração ocupa um lugar de destaque, visto que age sobre operações de empilhamento (formação) de uma pilha de produto e também na retomada (recuperação) destas pilhas. Normalmente, existe uma especificação de qualidade acordada entre as áreas da mina, incluindo controle de qualidade, desenvolvimento de produto, relações comerciais e clientes (sejam eles internos ou externos). Tais especificações norteiam as diversas operações unitárias, de forma que os limites acordados de variação de qualidade para os diversos parâmetros (%Fe, %SiO<sub>2</sub> e %P, entre outros) sejam respeitados. Além das especificações tradicionais, também podem ser utilizados acordos internos de nível de serviço (*Service Level Agreement* - SLA) onde, para cada etapa do processo produtivo ou etapa no fluxo da cadeia produtiva, a qualidade seja controlada e possíveis desvios possam ser tratados com mais eficiência.

Minas de extração normalmente utilizam o indicador OQE - *Overall Quality of Production Effectiveness* (Qualidade Global Efetiva) para medição da qualidade dos seus produtos. O OQE é aplicado nos processos desde a mina até o porto, apoiando-se na função-perda de Taguchi (*Loss Function*). A função de Taguchi, vastamente utilizada em cenários de engenharia, utiliza uma combinação de métodos estatísticos para alcançar melhorias rápidas na qualidade e no custo através da otimização do design do produto e do processo de produção. Taguchi (1978) define o custo como uma perda imposta à sociedade antes que o produto seja disponibilizado para os consumidores. A Figura 2.1 ilustra a função perda, onde se deseja que os limites de especificação estejam próximos ao alvo central “T”. LSE e LIE são os limites de especificação simétricos padronizados, e o eixo vertical é a medida do valor de perda devido ao desvio da característica do nível desejado. A função perda de Taguchi ainda estabelece uma medida financeira para o cálculo do desvio de uma característica do produto com relação ao valor nominal conforme  $L = k(y - T)^2$ , onde  $L$  representa a perda devido ao desvio da característica;  $k$  o coeficiente de perda;  $y$  o valor da característica de qualidade; e  $T$  o valor nominal ou valor alvo.

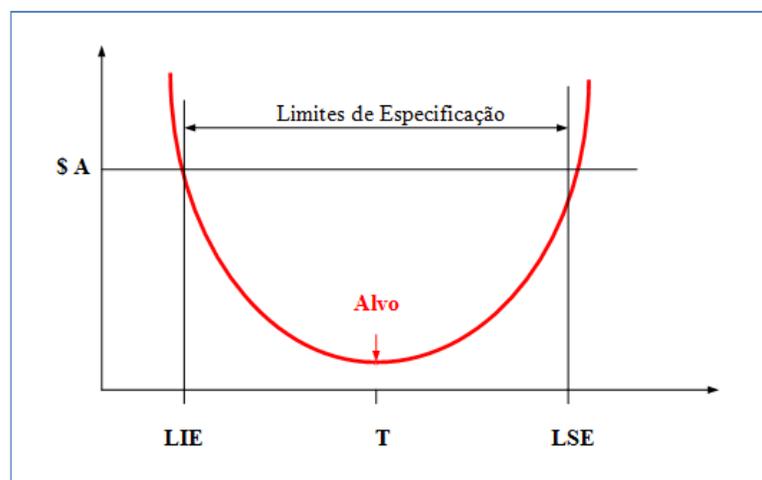


Figura 2.1 – Função perda de Taguchi. Fonte: Kackar (1986)

### **2.2.2.2 Tempo de Residência do minério**

A liberação de água (umidade) de uma pilha de minério é um critério fundamental em pátios de estocagem de minério, pois pode influenciar no processo de beneficiamento (visto que, em alguns destes processos, a umidade poderá elevar-se ainda mais devido à adição de água). Por este motivo, é de grande importância que uma pilha de produto beneficiado aguarde determinado período de tempo após sua formação no pátio de estocagem, a fim de que o material reduza seu nível de umidade. Segundo Chaves (2012), o controle da umidade é muito importante no processo de recuperação, pois poderá trazer problemas operacionais no empilhamento e na retomada do minério.

Dronkers e Zimmerman (1982) definem tempo de residência como o tempo que a pilha aguarda no pátio a partir de sua formação até o seu carregamento para que uma parcela da água existente na pilha esorra. Tempos de residência reduzidos faz com que os níveis de umidade sejam elevados por deficiência na drenagem, contribuindo para a compactação do minério durante o seu transporte na ferrovia. Tal minério tende então a fixar-se nas paredes dos vagões, comprometendo sua descarga (ou seja, o minério não se desprende facilmente dos vagões no momento de sua descarga e haverá um maior gasto com recursos para retirar este minério dos vagões). Dificuldades no processo de descarregamento decorrentes de tempo insuficiente de residência também afetam na segurança dos operadores no momento da descarga do minério e no trajeto destes vagões na ferrovia, visto que material aglutinado (massa conhecida como carga morta) pode comprometer o equilíbrio dos vagões e gerar risco de tombamento ou descarrilamento destes vagões durante seu transporte até o porto.

### **2.2.2.3 Tempo de mudança de pilha (*Setup*)**

Os tempos de setup compreendem o tempo de preparação de uma máquina para processar a tarefa seguinte, o qual inclui operações de agrupamento de ferramentas necessárias e limpeza

de máquina, entre outras situações (GILIO, 2007). Os tempos de setup podem ser dependentes ou independentes da sequência de execução das tarefas. Quando o setup depende apenas da tarefa que espera por processamento, ele é considerado independente, quando o setup também depende da tarefa que foi processada anteriormente na máquina, é então considerado dependente. A assimetria ocorre quando o setup da tarefa i para a j é diferente do setup da tarefa j para i (FUCHIGAMI; MOCCELLIN, 2009). Gilio (2007) também classifica os setups como antecipados quando os ajustes podem ser feitos antes da chegada da tarefa na máquina, se esta estiver ociosa, ou não-antecipados quando é necessário que a tarefa esteja fisicamente na máquina enquanto os ajustes são feitos. Wobeto (2008) também classifica os *setups* em *setup* para tarefas individuais (*non-batch setup*), quando envolve o tempo de troca entre diferentes tarefas e *setup* para lotes de tarefas (*batch setup*), quando existe tempo de troca entre diferentes agrupamentos de tarefas.

O tipo de equipamento utilizado para recuperação do minério também afeta o tempo de *setup* entre pilhas. Chaves (2012) destaca a importância dos processos de empilhamento e retomada de pilhas para as indústrias mineral e metalúrgica, afirmando que diferentes modelos de equipamentos poderão ser construídos de acordo com a complexidade demandas e exigências específicas de cada cliente. Normalmente, as recuperadoras são dotadas de uma roda de caçamba giratória com várias pás presa a uma ponta de uma lança; esse sistema é suportado por um “carro” com um conjunto de rodas que se movimentam sobre trilhos instalados ao longo dos pátios e possuem capacidades de retomada podendo variar de 100 a mais de 8000 t/h. A recuperadora é instalada nos pátios de estocagem e movimentam-se no sentido longitudinal aos mesmos (movimento de translação) e podem girar num ângulo de 180° (movimento de giro), fazendo com que esta possa recuperar em dois pátios paralelos. Tal tempo de trânsito entre a pilha que acaba de ser recuperada e a próxima a ser removida caracteriza o tempo de setup em uma mina. Para tanto, é fundamental que seja construída uma

matriz “De-Para” trazendo os tempos de deslocamento entre pilhas no pátio (matriz *setup*); tal matriz será relevante na estimativa do índice de priorização de pilhas.

#### **2.2.2.4 Balanceamento dos pátios**

Os sistemas de empilhamento e recuperação instalados nos pátios de estocagem de minas normalmente estão dispostos em vários circuitos de correias transportadoras, as quais transportam o minério entre as diversas etapas do processo produtivo (desde o início do processo de beneficiamento do minério, ainda na mina, até seu empilhamento no pátio de estocagem e o carregamento deste minério nos vagões).

É desejável que a distribuição de massa das pilhas nos pátios seja uniforme, de maneira a reduzir a necessidade de deslocamento da recuperadora para encontrar uma nova pilha dentro das características desejadas. Um balanceamento adequado de massa também facilita situações onde existam restrições de movimentação geradas por manutenção no pátio ou quebra de outra recuperadora no mesmo trilho (normalmente devido à quebra ou manutenção nos trilhos ou de outro equipamento existente no sistema) (MOURA, 1997).

### **2.3. Método**

Esta seção detalha as etapas operacionais do método proposto.

#### **2.3.1 Verificação das máquinas e das pilhas (tarefas) a serem sequenciadas**

Nesta etapa, avalia-se o número de pilhas existentes nos pátios e suas respectivas massas, o número de pátios em que as recuperadoras (máquinas) irão atuar e o número de máquinas existentes. Considere um sistema genérico composto por dois pátios, A e B, com duas máquinas (M1 e M2) aptas a recuperarem pilhas de ambos os pátios (ilustrado na Figura 2.2). As pilhas pertencentes ao pátio A são identificadas por  $P_A1, P_A2, P_A3, \dots, P_Ai$ , enquanto que as

pilhas pertencentes ao pátio B são descritas por  $P_{B1}, P_{B2}, P_{B3}, \dots, P_{Bj}$ ;  $m$  é a massa existente em cada pilha. O método proposto pode ser estendido a qualquer número de máquinas e pilhas.

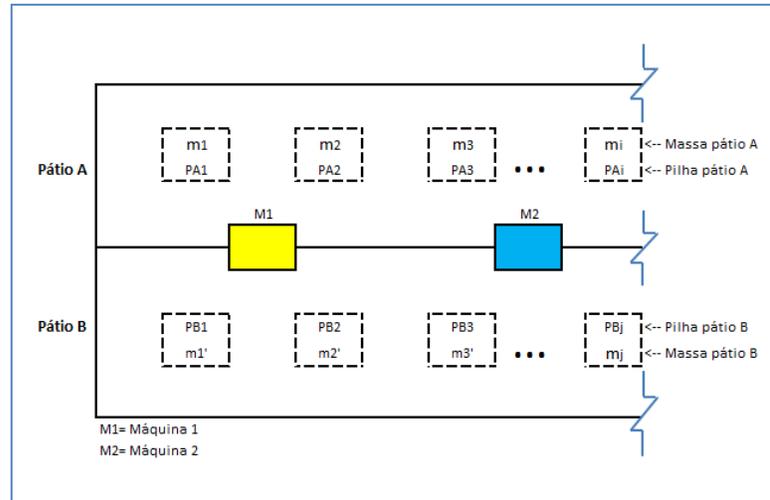


Figura 2.2 – Representação esquemática dos pátios, pilhas e recuperadoras

### 2.3.2 Alocação das pilhas às máquinas em função de suas capacidades

As capacidades de recuperação das máquinas irão determinar o número de tarefas (pilhas a serem recuperadas) a serem alocadas a estas máquinas. Considere as capacidades das máquinas M1 e M2 como  $CapM1$  e  $CapM2$ , respectivamente; o número total de pilhas nos pátios A e B é  $n$ . O número de pilhas a serem alocadas às máquinas M1 e M2,  $QM1$  e  $QM2$ , respectivamente, é definido pelas equações (1) e (2).

$$QM1 = n \cdot \left[ \frac{CapM1}{CapM1 + CapM2} \right] \quad (1)$$

$$QM2 = n \cdot \left[ \frac{CapM2}{CapM1 + CapM2} \right] \quad (2)$$

Na sequência, as pilhas são alocadas às máquinas recuperadoras. Para a escolha das pilhas, as máquinas partirão de uma posição inicial nos extremos do pátio, movendo-se em direção ao centro do pátio e varrendo o número de pilhas definido pelas equações (1) e (2), conforme

ilustrado na Figura 2.3. Tal sistemática pode ser estendida para cenários onde um maior número de recuperadoras é disponível. Neste exemplo genérico, duas seriam posicionadas nos extremos do pátio, e as demais seriam proporcionalmente distribuídas no meio do pátio. Devido à disposição física das pilhas nos pátios, algumas pilhas poderão ser alocadas tanto à máquina M1 quanto à máquina M2. Nestes casos, sugere-se a alocação da pilha de maior massa à máquina de maior capacidade.

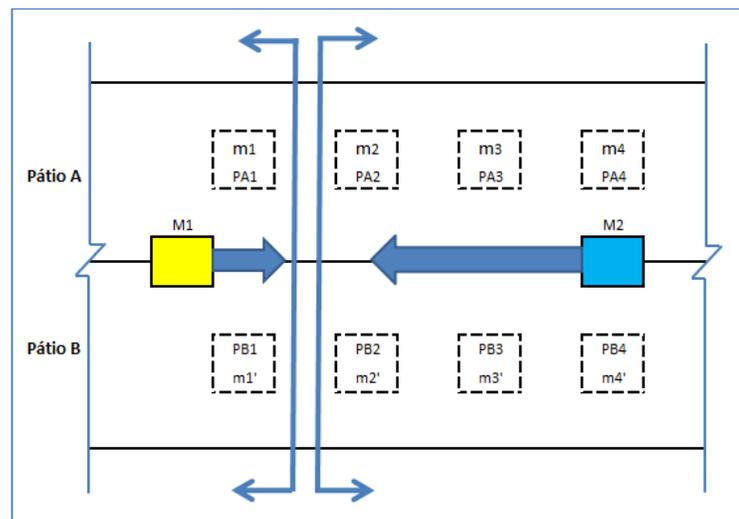


Figura 2.3 – Alocação das pilhas no pátio às máquinas M1 e M2

Na sequência, com a aplicação da equação (3), verifica-se o balanceamento das pilhas alocadas a cada máquina. No exemplo genérico da Figura 2.3, as pilhas  $P_A1$  e  $P_B1$  são direcionadas à máquina M1 e as pilhas  $P_A2, P_A3, P_A4, P_B2, P_B3$  e  $P_B4$ , à máquina M2. A quantidade de pilhas para cada máquina dependerá tanto do tamanho das pilhas (massa das pilhas) quanto da capacidade das recuperadoras.

$$IBP(\text{máquina } i, \text{pátio } j) = \frac{\sum \text{massas máquina } i, \text{pátio } j}{\sum \text{massas máquina } i} \quad (3)$$

O quadro 2.1 resume as equações para o balanceamento em dois pátios (A e B) e duas máquinas (M1 e M2).

Quadro 2.1 – Cálculo do índice de balanceamento de pátio.

		Pátio		
		A	B	
Máquina	M1	$IBP(M1,A) = \frac{\sum mM1A}{\sum mM1}$	$IBP(M1,B) = \frac{\sum mM1B}{\sum mM1}$	Índice de balanceamento de pátio (IBP)
	M2	$IBP(M2,A) = \frac{\sum mM2A}{\sum mM2}$	$IBP(M2,B) = \frac{\sum mM2B}{\sum mM2}$	

onde

$\sum mM1A$  é o somatório das massas das pilhas que pertencem a Máquina M1 e ao pátio A;

$\sum mM1B$  é o somatório das massas das pilhas que pertencem a Máquina M1 e ao pátio B;

$\sum mM1$  é o somatório das massas das pilhas que pertencem a Máquina M1;

$\sum mM2A$  é o somatório das massas das pilhas que pertencem a Máquina M2 e ao pátio A;

$\sum mM2B$  é o somatório das massas das pilhas que pertencem a Máquina M2 e ao pátio B; e

$\sum mM2$  é o somatório das massas das pilhas que pertencem a Máquina M2.

### 2.3.3 Cálculo do índice de qualidade das pilhas ( $Q_i$ )

Nesta etapa, os índices de qualidade das pilhas são calculados através das equações (4) e (5),

as quais são adaptadas da função perda de Taguchi

$$Q_i = OQE = 10 - K(\text{Meta} - x_i)^2 \quad (4)$$

$$K = \frac{10}{(\text{Meta} - \text{Limite})^2} \quad (5)$$

Onde OQE é o *Overall Quality of Production Effectiveness* (Qualidade Global Efetiva); K é o coeficiente de perda; Meta é a meta da especificação do parâmetro; e Limite são os limites inferior ou superior (LIE ou LSE) de qualidade do parâmetro.

Para o cálculo do índice de qualidade, serão considerados somente valores maiores ou iguais a 1, justificado pelo fato deste valor participar da equação do índice de prioridade como um elemento de multiplicação (sendo o número 1 um elemento neutro). Portanto, valores de OQE menores que 1 serão considerados iguais a 1.

#### 2.3.4 Construção da matriz de tempo de mudança de pilha (*Matriz Setup*)

A matriz de setup avalia as potenciais mudanças entre pilhas e seus respectivos tempos ( $S_i$ ), conforme ilustrado na Figura 2.4. Tais dados são extraídos de medições diretas de tempo de movimentação de máquinas entre pilhas.

		Para			
		P3	P4	P5	
De	P3	-	S4	S5	•••
	P4	S1	-	S6	•••
	P5	S2	S3	-	•••
		• • •	• • •	• • •	

Figura 2.4 – Matriz *setup* com os valores dos tempos ( $S_i$ )

A matriz de *setup* pode contemplar outros fatores que influenciam no deslocamento entre pilhas, os quais incluem restrições de mudança entre pilhas ou bloqueio físico decorrente de procedimentos de manutenção. Tais fatores são quantificados por especialistas de processo e adicionados à distância que separa as pilhas, para posterior inserção na matriz de *setup*.

### 2.3.5 Obtenção dos tempos de residência das pilhas ( $T_i$ )

Os tempos de residência  $T_i$  são estimados em função dos horários de início e término da formação de uma pilha, ou seja, é o tempo compreendido entre o início do empilhamento do minério no pátio em uma determinada pilha até o início da recuperação desta pilha. Sistemas produtivos com tecnologia *Enterprise Resource Planning* (ERP) fazem a coleta constante destes valores, facilitando sua obtenção.

### 2.3.6 Cálculo do índice de priorização de pilha (IP)

A equação (6) traz o índice de priorização da pilha  $i$  ( $IP_i$ ) proposto, o qual permite definir a ordem de recuperação das pilhas. Tal índice visa priorizar a recuperação de pilhas que demandam menor deslocamento da recuperadora em relação a sua posição atual (movendo-se de uma pilha para outra), e priorizar pilhas com melhor qualidade e maior tempo de residência. Além disso, a formulação proposta evita desbalanceamentos entre os dois pátios, o que normalmente ocorre quando pilhas de um único pátio são sucessivamente recuperadas por estarem mais próximas, ou apresentarem melhor qualidade e/ou menor tempo de residência. Quanto maior o IP de uma pilha, maior será sua prioridade de recuperação.

$$IP_i = Q_i \cdot T_i \cdot \frac{1}{S_i} \cdot IBP_i \quad (6)$$

Onde  $Q_i$  é o índice de qualidade de cada pilha;  $T_i$  é o tempo de residência de cada pilha;  $S_i$  é o tempo de mudança entre a pilha atual em recuperação até a pilha  $i$  (tempo de *setup*); e  $IBP_i$  é o índice de balanceamento de pátios.

## 2.4. Aplicação da sistemática em um sistema de recuperação de minério

A sistemática proposta para sequenciamento do processo de recuperação de pilhas foi aplicada na mina de Carajás, a qual iniciou suas operações de extração em 1985. Atualmente é considerada como a maior mina de ferro a céu aberto no mundo, tendo alcançado marca de

um bilhão de toneladas produzidas em 2007; sua produção anual é de aproximadamente 110 milhões de toneladas métricas.

O processo produtivo se inicia com a lavra da matéria prima principal - ROM (“*Run of Mine*”), proveniente das cavas existentes. Na sequência, tal material é processado pela usina de beneficiamento através das operações de cominuição, peneiramento, desaguamento, espessamento e moagem. Após o processamento do ROM, os produtos (minérios) são gerados de acordo com diversas composições e granulometria.

Depois de beneficiados, os produtos são transportados para os pátios de estocagem, os quais possuem capacidade de aproximadamente dois milhões de toneladas métricas. O pátio de estocagem é de fundamental importância para o processo produtivo por conta de suas várias funções. Uma delas é a redução nos desvios da qualidade do minério extraído, visto que a disponibilização de pilhas com diferentes níveis de qualidade permitem as mesmas sejam combinadas de maneira a atingirem o nível de qualidade desejado para destino específico. Outra função importante do pátio é o desaguamento (drenagem) do minério, uma vez que o minério é empilhado ainda úmido. Devido à inexistência de uma pilha de homogeneização para alimentar a usina, a flexibilidade na formação físico-química das pilhas é possível com a alternância de empilhamento. Tal alternância permite corrigir desvios dos teores químicos e minimizar flutuações da qualidade na mina, garantindo níveis de qualidade dentro das especificações. Após a estocagem dos produtos, inicia-se o processo de carregamento das pilhas de minério nos vagões (expedição). A proposição de uma sistemática estruturada para escolha e ordenamento das pilhas a serem recuperadas é o principal objetivo deste artigo, visto que a ordem de retomada das pilhas é definida de forma empírica.

O método proposto foi aplicado em um sistema composto por dois pátios (A e B), com duas máquinas recuperadoras (M1 e M2) e doze pilhas (sendo cada pilha representada por  $PA_j$  e  $PB_j$ , onde  $A$  e  $B$  = pátios e  $j$  = número da pilha). As recuperadoras (M1 e M2) apresentam

capacidades de 6.000 ton./h e 8.000 ton./h, respectivamente. A Figura 2.5 ilustra esta configuração, especificando o volume de minério em cada pilha (massas em kt [ $\times 1.000$ ]) antes do início da etapa de recuperação.

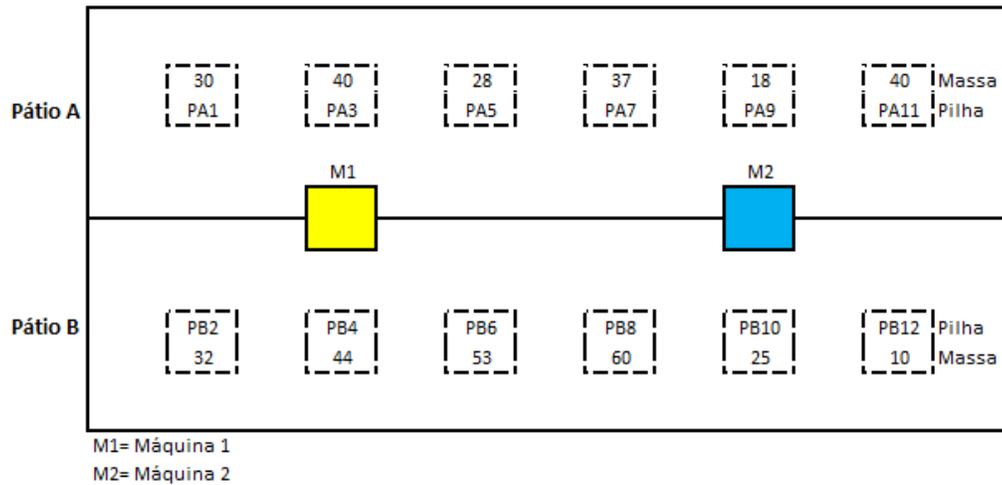


Figura 2.5 – Representação dos pátios, pilhas e suas massas e recuperadoras.

As equações (1) e (2) permitem determinar o número de pilhas a serem alocadas a cada máquina, como segue.

$$QM1 = n \cdot \left[ \frac{CapM1}{CapM1+CapM2} \right] = 12 \cdot \left[ \frac{6.000}{6.000+8.000} \right] = 5,14 \sim 5 \text{ pilhas}$$

$$QM2 = n \cdot \left[ \frac{CapM2}{CapM1+CapM2} \right] = 12 \cdot \left[ \frac{8.000}{6.000+8.000} \right] = 6,86 \sim 7 \text{ pilhas}$$

Atribuindo-se as pilhas às máquinas M1 e M2 de acordo com suas distâncias iniciais das máquinas, obtém-se o cenário da Figura 2.6.

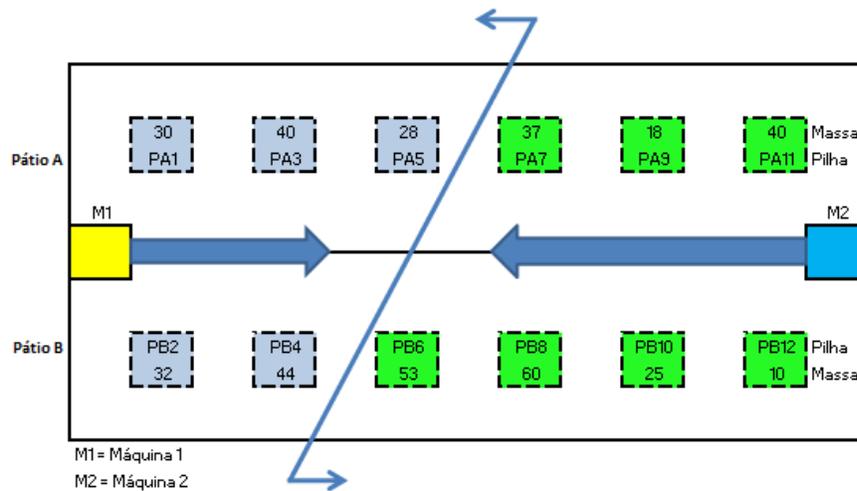


Figura 2.6 – Representação das pilhas e as suas respectivas máquinas

Em função das suas posições nos pátios, as pilhas  $P_{A5}$  e  $P_{B6}$  poderiam ter sido alocadas tanto para M1 quanto para M2. Conforme sugerido em (2.3.2), a pilha com maior massa ( $P_{B6} = 53$  kt) foi alocada para a máquina de maior capacidade ( $M2 = 8.000$  ton/h.). A equação (3) permite estimar a distribuição (balanceamento) das máquinas e pátios, como exemplificado para a Máquina 1 e Pátio A.

$$IBP(M1,A) = \frac{\sum m_{M1A}}{\sum m_{M1}} = \frac{m_1 + m_3 + m_5}{m_1 + m_3 + m_5 + m_2 + m_4} = \frac{30 + 40 + 28}{30 + 40 + 28 + 32 + 44} \cong 0,563$$

A Tabela 2.1 sumariza os valores dos balanceamentos dos pátios para as máquinas e seus respectivos pátios.

Tabela 2.1 – Índice de balanceamento de pátio (IBP) por quadrante

		Pátio		Índice de balanceamento de pátio (IBP)
		A	B	
Máquina	M1	<b>IBP = 0,563</b> <b>Pilhas P1, P3 e P5</b>	<b>IBP = 0,437</b> <b>Pilhas P2 e P4</b>	
	M2	<b>IBP = 0,391</b> <b>Pilhas P7, P9 e P11</b>	<b>IBP = 0,609</b> <b>Pilhas P6, P8, P10 e P12</b>	

Na sequência, o percentual de ferro (%Fe) das pilhas no pátio é utilizado para o cálculo do índice de qualidade das mesmas, conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Teor de ferro das pilhas no pátio

Pilha	%Fe	Pilha	%Fe
PA1	65,25	PB2	64,38
PA3	65,00	PB4	63,99
PA5	65,40	PB6	65,89
PA7	61,45	PB8	64,25
PA9	64,10	PB10	63,48
PA11	62,12	PB12	66,18

Considerando-se as especificações de qualidade vigentes atualmente na mina (Meta = 64,30; LIE = 63,30 e LSE = 65,30), obtém-se  $K$  e os índices de qualidade apresentados na Tabela 2.3 utilizando-se as equações (4) e (5).

$$K = \frac{10}{(\text{Meta} - \text{Limite})^2} = \frac{10}{(64,30 - 63,30)^2} = 10$$

$$Q_i = 10 - K(\text{Meta} - x_i)^2$$

Tabela 2.3 – Índice de qualidade das pilhas nos pátios

Pilha	%Fe	Qj	Pilha	%Fe	Qj
PA1	65,25	1	PB2	64,38	9,94
PA3	65,00	5,10	PB4	63,99	9,04
PA5	65,40	1	PB6	65,89	1
PA7	61,45	1	PB8	64,25	9,98
PA9	64,10	9,60	PB10	63,48	3,28
PA11	62,12	1	PB12	66,18	1

Na sequência, construiu-se uma matriz de tempo acerca do deslocamento entre pilhas (matriz *setup*), apresentada na Tabela 2.4. Tais tempos foram estimados levando-se em conta os movimentos de translação (longitudinal ao pátio) e rotação (giro) da recuperadora.

Tabela 2.4 – Matriz *setup* com os valores dos tempos em minutos (Si).

De	Para											
	PA1	PB2	PA3	PB4	PA5	PB6	PA7	PB8	PA9	PB10	PA11	PB12
PA1	-	7	5	12	10	17	15	22	20	27	25	32
PB2	7	-	12	5	17	10	22	15	27	20	32	25
PA3	5	12	-	7	5	12	10	17	15	22	20	27
PB4	12	5	7	-	12	5	17	10	22	15	27	20
PA5	10	17	5	12	-	7	5	12	10	17	15	22
PB6	17	10	12	5	7	-	12	5	17	10	22	15
PA7	15	22	10	17	5	12	-	7	5	12	10	17
PB8	22	15	17	10	12	5	7	-	12	5	17	10
PA9	20	27	15	22	10	17	5	12	-	7	5	12
PB10	27	20	22	15	17	10	12	5	7	-	12	5
PA11	25	32	20	27	15	22	10	17	5	12	-	7
PB12	32	25	27	20	22	15	17	10	12	5	7	-

Por sua vez, a Tabela 2.5 traz os tempos de residência das pilhas no pátio, também representados em minutos.

Tabela 2.5 - Tempo de residência das pilhas em minutos

Pilha	PA1	PB2	PA3	PB4	PA5	PB6	PA7	PB8	PA9	PB10	PA11	PB12
t(min)	4.320	5.472	1.440	7.344	7.056	4.320	720	2.880	8.640	4.032	2.880	1.296

Por fim, a tabela 2.6 compila as informações de todas as pilhas analisadas, juntamente com os índices de prioridade estimados através da equação (6)

Tabela 2.6 – Cálculo do índice de priorização de pilhas.

		<b>Qi</b>	<b>Ti</b>	<b>Si</b>	<b>IBPi</b>	<b>IPi</b>
<b>Máquina 1</b>	PA5	-	-	-	-	-
	PA1	1	4.320	10	0,563	<b>243,3</b>
	PA3	5,10	1.440	5	0,563	<b>827,3</b>
	PB2	9,94	5.472	17	0,437	<b>1.396,9</b>
	PB4	9,04	7.344	12	0,437	<b>2.416,2</b>
<b>Máquina 2</b>	PB12	-	-	-	-	-
	PA7	1	720	17	0,391	<b>16,6</b>
	PA9	9,60	8.640	12	0,391	<b>2.702,2</b>
	PA11	1	2.880	7	0,391	<b>160,8</b>
	PB6	1	4.320	15	0,609	<b>175,4</b>
	PB8	9,98	2.880	10	0,609	<b>1.749,7</b>
	PB10	3,28	4.032	5	0,609	<b>1.609,0</b>

As pilhas  $P_{A5}$  e  $P_{B12}$  foram escolhidas arbitrariamente como pilhas de partida do modelo, ou seja, pilhas que estão sendo recuperadas e de onde partirão as máquinas recuperadoras. Desta forma, a ordem de recuperação das pilhas para M1 é  $P_{A5}, P_{B4}, P_{B2}, P_{A3}$  e  $P_{A1}$ ; para M2 é  $P_{B12}, P_{A9}, P_{B8}, P_{B10}, P_{B6}, P_{A11}$  e  $P_{A7}$ . A sequência sugerida pela sistemática proposta foi considerada satisfatória pelos especialistas de processo, pois sugeriu que a máquina 2 partisse da pilha  $P_{B12}$  e então para a pilha  $P_{A9}$  ( $IPi = 2.702,2$ ), ou seja, para uma pilha mais afastada no pátio e com qualidade inferior se comparada com a pilha  $P_{B8}$ , com  $IPi = 1.749,7$ . Tal escolha, no entanto, justifica-se pelo fato da pilha  $P_{A9}$  estar com um tempo de residência três vezes maior do que a pilha  $P_{B8}$ , o que encontra respaldo em critérios práticos.

## 2.5. Conclusão

Neste artigo foi proposta uma heurística de sequenciamento para a retomada de pilhas de minério no pátio de estocagem utilizando critérios tidos como importantes em termos de

desempenho operacional dos processos de pátio, carregamento de vagões e atendimento aos clientes da cadeia produtiva da mineração. O índice de prioridade proposto apoia-se em critérios que incluem qualidade do minério, tempo de deslocamento das recuperadoras entre pilhas (*setup*), tempo de residência e o balanceamento dos pátios. A inserção de tais fatores em índices de priorização de recuperação permite reduzir diversos problemas de processo associados à alta variabilidade da qualidade no produto final, desperdício de tempo com longas manobras no pátio ou por problemas relacionados ao manuseio do produto (*handling*), recuperação de pilhas com baixos tempos de residência acarretando problemas na descarga dos vagões no porto e falta de pilhas em algumas partes do pátio (o que aumenta o desperdício no processo). É esperado que a aplicação da heurística proposta beneficie os processos da mina de Carajás, principalmente em termos de aumento da qualidade (com a redução nos desvios padrão) do produto final, produtividade de toda cadeia e, conseqüentemente, na redução dos custos operacionais. Ao se aplicado em um cenário real de recuperação, os resultados gerados pelo método foram considerados consistentes por especialistas de processo.

A proposição desta heurística também contribui academicamente, pois verifica-se uma carência de estudos sobre sequenciamento voltados para operações de pátio de estocagem, formação de pilhas (empilhamento) e recuperação destas para o carregamento de vagões.

Para futuras pesquisas na área de pátios de estocagem de minérios, sugere-se a criação de uma heurística que considere dependência entre as recuperadoras no pátio. Esta configuração traz grandes benefícios em termos de flexibilidade operacional: por exemplo, uma pilha com qualidade inferior à especificação (que não teria alta prioridade no método aqui proposto) passa a ser recuperada juntamente com outra pilha com qualidade acima das especificações e, desta forma, a qualidade do *blending* final não seja comprometida.

## Referências

BLEY, A., BOLAND, N., FRICKE, C., and FLOYLAND, G. (2010). **A strengthened formulation and cutting planes for the open pit mine production scheduling problem.** *Computers & Operations Research*, 37, 1641-1647.

BOLAND, N., DUMITRESCU, FLOYLAND, G., and GLEIXNER, A. M. (2009). **LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity.** *Computers & Operations Research*, 36, 1064-1089.

CHAVES, A. P., **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Manuseio de Sólidos e Granulados.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CULLENBINE, C., Wood, R. K., and NEWMAN, A., (2011). **A Sliding Time-Window Heuristic for Open Pit Mine Block Sequencing.** *Optimization Letters*, 5, pp. 365-377.

DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos de Administração da Produção.** 3. ed. São Paulo: Bookman. Porto Alegre, 2001.

DRONKERS, J., and J. T. F. Zimmerman. **Some principles of mixing in tidal lagoons.** *Oceanologia acta. Proceedings of the International Symposium on Coastal Lagoons*, Bordeaux, France, 1982.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações.** 8. ed. São Paulo: Pioneira, 2002.

GILIO, N. C. **Método heurístico para o problema de no-wait flow shop com setup separado e independente da sequencia.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

KACKAR, R. N., **Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary.** *Quality Progress*, p. 21-29, New York, 1986.

LIU, S. Q., and KOSAN, E. (2009). **Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem.** *Computers & Operations Research*, 36, 2840-2852.

MESQUITA, M.; COSTA, H. G.; LUSTOSA, L.; SILVA, A. S. Programação detalhada da produção. In: LUSTOSA, L. J.; MESQUITA, M. A.; QUELHAS, O.; OLIVEIRA, R. **Planejamento e Controle da Produção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

MONKS, J. G. **Administração da Produção**. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.

MOURA, Reinaldo A., **Série Manual de Logística**. Volume 2. São Paulo: IMAM, 1997.

PINEDO, Michael, 2002. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems** – 2ª ed., Upper. Saddle River, NJ: Prentice Hall

PINEDO, Michael, 2008. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems** – 3ª ed., New Jersey, Prentice Hall.

REID, R. D.; SANDERS, N. R. **Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

TAGUCHI, G., “**Off-line and On-line Quality Control Systems.**” Proceedings of the International Conference on Quality Control, B4, Tokyo, Japan, 1978.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática**. São Paulo: Atlas. 2007.

VALE. Sistema Norte – **Processos das Minas de Ferro e Manganês e Atividades do Turno GADAN**. 2008. Relatório interno

WOBETO, E. I. **Uma abordagem heurística para o problema de planejamento da produção em fundições – estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

## 2 SEGUNDO ARTIGO

# MODIFICAÇÃO DA HEURÍSTICA ATCS PARA RETOMADA DE PILHAS DE MINÉRIO EM PÁTIOS DE ESTOCAGEM

### **Resumo**

Este artigo modifica a heurística de sequenciamento ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*) com vistas à sua aplicação na retomada de pilhas de minério (entendidas como tarefas a serem sequenciadas) em pátios de recuperação. Para tanto, inclui-se na formulação critérios relevantes para as operações de pátios de estocagem, como tempo disponível para o empilhamento de um produto, demanda relativa, tempo de recuperação da pilha e data de entrega, tempo de deslocamento das recuperadoras entre pilhas (setup) e índice de qualidade. O método proposto foi aplicado em um sistema de recuperação de minério composto por dois pátios, duas máquinas recuperadoras e doze pilhas. A sequência de recuperação gerada pela heurística proposta foi considerada coerente por especialistas de uma empresa mineradora.

Palavras-chaves: Heurística; ATCSM; ATCS; Sequenciamento; Pátios de estocagem.

### **Abstract**

*This work modifies the ATCS (Apparent Tardiness Cost with Setups) scheduling heuristic to be applied on the recovering process of ore piles (tasks to be sequenced). Therefore, we calculate an index for piles ordering relying on important factors for stockyard operations, including time available time for stacking, demand, recovery time and due date, setup between piles and quality index. The proposed method was applied to an iron ore recovering system composed of two stockyards, two machines reclaimers and twelve piles. The recovery sequence generated by the proposed heuristic was considered consistent by experts from a mining company.*

*Keywords: Heuristics; ATCSM; ATCS; Scheduling; Stockyards.*

### 3.1. Introdução

O processo de estocagem de minério em pátios de recuperação exerce uma importante função na cadeia produtiva dos minérios, visto que estabelece um vínculo entre o beneficiamento e o carregamento de vagões. Após o minério ser processado na usina de beneficiamento, os produtos são estocados em pilhas nos seus respectivos pátios a fim de permitir o desaguamento parcial do material (uma vez que o minério é tipicamente empilhado ainda úmido devido ao processo de beneficiamento, além de estar exposto às precipitações pluviométricas). Além da função de desaguamento, o estoque ajuda a absorver as variações de demanda no transporte e na produção, reduzindo possíveis desvios de qualidade. De tal forma, torna-se importante definir, de forma adequada, a ordem de retirada das pilhas do pátio com destino às etapas posteriores do processo.

Um sequenciamento adequado para recuperação das pilhas nos pátios permite redução de custos operacionais, mitigação de desvios de qualidade e minimização de problemas operacionais relativos ao manuseio (*handling*). A sequência de recuperação das pilhas depende de importantes fatores, como capacidade das máquinas recuperadoras, tempo disponível para o empilhamento de um produto, demanda dos produtos nos pátios, tempo de recuperação, data de entrega, qualidade e tempo de preparação para a recuperação (tempo de deslocamento das recuperadoras entre pilhas e pátios), entendida como tempo de *setup*.

Este artigo propõe a modificação da tradicional regra para sequenciamento ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*) com vistas à sua aplicação em recuperação de minério, dando origem à heurística *Apparent Tardiness Cost with Setups for Mineral recovery* (ATCSM). Para tanto, a heurística gera um índice de ordenamento das pilhas ( $I$ ), o qual direciona, com base em fatores relevantes para as operações de pátio, a próxima pilha a ser recuperada no pátio. Tais fatores incluem a capacidade das máquinas recuperadoras, tempo de estocagem,

demanda dos diferentes tipos de produtos, tempo de recuperação das pilhas, data de entrega das pilhas, tempo de mudança entre pilhas e qualidade do minério. A heurística proposta inicialmente aloca as pilhas a serem recuperadas às máquinas, de acordo com suas capacidades. Para o ordenamento das pilhas alocadas a cada máquina, são calculados os tempos de estocagem de cada pilha e a demanda relativa do produto a ser expedido. Na sequência, gera-se uma matriz de setup que contempla os tempos de trânsito da recuperadora entre as pilhas e o índice de qualidade das pilhas ( $Q$ ) baseado na função perda de Taguchi. Finalmente, o índice de ordenamento das pilhas  $I$  gerado pela ATCSM define a sequência de recuperação das pilhas atribuídas a cada recuperadora.

O artigo proposto está estruturado como segue. Na seção 2 é apresentada a fundamentação teórica de sequenciamento com ênfase nas regras ATC, ATC modificada e ATCS, bem como os critérios relevantes para o sequenciamento em pátios de recuperação de minério. A seção 3 detalha a geração da regra ATCSM para sistemas de recuperação de pátio, ao passo que a seção 4 traz a aplicação da ATCSM em uma mina. A seção 5 traz as considerações finais.

## **3.2. Fundamentação teórica**

### **3.2.1 Conceitos básicos de sequenciamento**

As técnicas de sequenciamento são de grande importância e impactam significativamente na eficiência de sistemas produtivos, visto que atuam na redução do tempo de execução das tarefas, nos custos envolvidos e no fornecimento de informações acerca dos processos.

Davis et al. (2001) e Monks (1987) definem sequenciamento como a determinação das máquinas ou centros de trabalho a serem utilizados no processamento de um conjunto de determinada tarefa. Técnicas de sequenciamento são bastante difundidas em organizações industriais, sendo aplicadas no apoio aos processos de decisão por meio da alocação de recursos e tarefas, além de permitir a definição de uma ordem apropriada para execução

destas de acordo com restrições específicas dos processos envolvidos. Problemas de sequenciamento são tipicamente resolvidos através de programação linear, enumeração total ou parcial, heurísticas e regras de prioridade.

As Regras de Prioridade (RP) são utilizadas para determinar a ordem de execução das tarefas nas máquinas ou centros de trabalho. Para Reid e Sanders (2005), quando existem várias tarefas aguardando o processamento em uma máquina ou centro de trabalho, é necessária a aplicação de uma ou mais RP para a definição da ordem de processamento. Os mesmos autores classificam as RP em locais ou globais, onde a RP local estabelece as prioridades baseando-se apenas em tarefas aguardando processamento em um centro de trabalho específico. As RP globais definem as regras de acordo com fatores específicos, como a carga de trabalho programada nas demais estações de trabalho pelas quais a tarefa deve ser processada. As RP mais comumente reportadas pela literatura podem ser encontradas em Monks (1987), Gaither e Frazier (2002), Tubino (2007) e Lustosa et al. (2008).

Na área de mineração, o sequenciamento tem sido aplicado com frequência em planejamento de lavra de minério. Cullenbine e Newman (2011) propuseram a heurística *Sliding time window heuristic* (STWH) para a definição de um cronograma de produção para a maximização do valor presente líquido (VPL) do corpo mineral a ser extraído. Boland et al (2009) argumentam que uma sequência adequada de lavra de blocos discretizados de uma mina traz ganhos significativos nas diversas esferas de planejamento e gestão do processo de lavra, bem como na redução de custos em todo o processo da mina. Com propósitos semelhantes, Bley et al (2010) desenvolveram uma formulação de programação inteira aplicando a redução das variáveis de decisão na formulação de um problema de extração mineral, o qual objetiva reduzir o esforço computacional demandado na determinação da melhor sequência de realização das tarefas.

Outras áreas de conhecimento correlatas ao processo de mineração também trazem aplicações relevantes de técnicas de sequenciamento. Liu e Kosan (2009) sugeriram a heurística *feasibility satisfaction procedure* (FSP), a qual utiliza um modelo gráfico para a obtenção de um sequenciamento viável para o problema *blocking parallel-machine job-shop scheduling* (BPMJSS), onde trens e suas viagens são considerados como máquinas e tarefas a serem sequenciadas. Semelhantemente, Carey (1994) apresentou um modelo de programação inteira para determinar o movimento dos trens de passageiros com objetivo de minimizar atrasos e custos, além de resolver conflitos entre rotas. Na aplicação do modelo, foi considerado um sistema com diversas restrições e linhas múltiplas com trens de diferentes velocidades e com paradas-padrão. Tais abordagens, focadas em aspectos logísticos, podem facilmente serem adaptadas ao contexto de mineração, o qual apoia-se substancialmente no transporte ferroviário. Não foram encontradas, no entanto, regras de despacho do tipo ATC em contexto de mineração.

### 3.2.2 Regras ATC, ATC modificada e ATCS

Conforme Pinedo (2008), regras de despacho de tarefas vêm sendo estudadas por várias décadas e podem ser classificadas de várias maneiras. Tipicamente, as regras de despacho que não possuem dependência com o tempo são classificadas como regras estáticas, sendo utilizadas apenas em função da máquina ou da tarefa (*job*) a ser realizado. Regras que possuem dependência com o tempo são classificadas como regras dinâmicas. As regras de despacho mais relevantes são agora apresentadas.

Segundo Vepsalainen e Morton (1987), a heurística ATC é um exemplo de regra composta que se aplica a problemas de 1 máquina e  $n$  tarefas com o objetivo de minimizar o atraso ponderado. A regra ATC combina a regra estática “*Weighted Shortest Processing Time*” (WSPT) com a regra dinâmica “*Minimum Slack*” (MS). Na regra WSPT, o peso  $w_j$  da tarefa  $j$

pode representar, por exemplo, o custo por unidade de tempo de processamento; as tarefas podem ser ordenadas em ordem decrescente de  $w_j/p_j$ , onde  $p_j$  representa o tempo de processamento da tarefa  $j$ . Na regra MS, com o decorrer do tempo  $t$  e quando a máquina se torna livre, é escolhida a tarefa com a menor folga  $\max(d_j - p_j - t, 0)$ , sendo  $d_j$  a data de entrega da tarefa e  $t$  o tempo decorrido desde a última tarefa até a máquina esteja novamente livre.

Na aplicação da heurística ATC, um índice de classificação é calculado apoiando-se nos parâmetros  $w_j$ ,  $p_j$ ,  $d_j$  e  $t$  para que a próxima tarefa seja escolhida, conforme a equação (1). O termo exponencial prioriza tarefas com baixa folga entre a sua data de entrega e o tempo demandado para seu processamento.

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K\bar{p}}\right) \quad (1)$$

O sequenciamento utilizando-se a regra ATC inicia-se com o contador de tempo  $t$  zerado. Calcula-se  $I_j$  para todas as tarefas disponíveis para sequenciamento através de (1); a tarefa com maior  $I_j$  é selecionada como a primeira a ser processada. Posteriormente, ocorre a atualização das informações dos parâmetros da equação, incluindo o tempo decorrido para o processamento da tarefa selecionada e os tempos médios de processamento  $\bar{p}$  juntamente com as novas tarefas disponíveis para o processamento. O processo de cálculo é repetido até que não haja mais tarefas a serem sequenciadas.

Na equação (1), o fator  $K$  é tido como o parâmetro de escalonamento designado na literatura como parâmetro de “*look-ahead*”, que é determinado de forma empírica. Um  $K$  elevado faz com que a regra ATC seja reduzida à regra WSPT. Caso haja um valor de  $K$  reduzido e não haja tarefas fora do prazo, a regra reduz-se à regra MS. Caso o valor de  $K$  seja reduzido e existam tarefas fora de prazo, a regra reduz-se à regra WSPT aplicada às tarefas fora do prazo.

Em Raman et al (1989) foi proposta a regra de despacho ATC-modificada para inclusão de tempos de preparação no cálculo dos índices de prioridade; de tal forma que os impactos da última tarefa processada  $l$  sejam considerados na análise. A inclusão deste parâmetro é relevante em termos práticos, visto que usualmente se busca reduzir os tempos de setup. A equação (2) traz o ATC modificado:

$$I_j(t, l) = \frac{w_j}{p_j + sl_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - sl_j - t, 0)}{K\bar{p}}\right) \quad (2)$$

Onde  $sl_j$  é a influência dos tempos de preparação; os demais parâmetros são idênticos às definições anteriores.

Por sua vez, Lee et al. (1997) propuseram uma extensão da heurística ATC-modificada, denominada *Apparent Tardiness Cost with Setups* (ATCS), conforme a equação (3). A modificação mais significativa ocorre na inclusão de um segundo termo exponencial que considera os tempos de preparação entre a tarefa que acaba de ser concluída,  $l$ , e a próxima tarefa candidata a processamento,  $j$ . Os autores reforçam que os resultados obtidos pela regra ATCS reduzem os níveis de atraso em mais de 30% quando comparado à regra anterior. Complementarmente, Pinedo (2008) sustenta que a regra ATCS combina em um único índice de ordenamento as regras WSPT, MS e “*Shortest Setup Time*” (SST), onde uma nova tarefa é selecionada com base no seu tempo de *setup*.

$$I_j(t, l) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_1\bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{sl_j}{K_2\bar{s}}\right) \quad (3)$$

onde  $\bar{s}$  é a média dos tempos de *setup* das tarefas a serem sequenciadas,  $K_1$  e  $K_2$  são parâmetros de escala relacionados com o tempo de entrega e *setup*, respectivamente, e obtidos de forma empírica. Sempre que uma tarefa é concluída, a regra ATCS recalcula o índice de ordenamento das tarefas.

### **3.2.3 Critérios relevantes para o sequenciamento em pátios de recuperação de minério**

Problemas em processos de beneficiamento, estocagem e transporte, dentre outros, impactam significativamente no volume estocado nos pátios, fazendo com que a escolha de critérios adequados para sequenciamento das pilhas sejam fundamentais. Critérios relevantes com vistas ao sequenciamento de recuperação de pilhas são detalhados na sequência.

#### **3.2.3.1 Tempo de estocagem e demanda relativa**

O tempo de estocagem de uma pilha indica quanto tempo a mesma ainda dispõe para o seu recolhimento no pátio (produção). Tal variável apoia-se na capacidade de estocagem da pilha, na quantidade estocada em determinado momento e na capacidade da recuperadora que irá movimentar esta pilha. Na prática, pilhas com baixos tempos de estocagem são prioritárias em termos de recuperação, visto que, caso esta pilha venha a atingir a capacidade máxima de empilhamento, a empilhadeira ficará impedida de recolher nesta pilha até que a mesma seja recuperada novamente parcial ou totalmente.

É bastante comum, nos processos de operação de pátio, que determinado produto (tipo de minério) apresente maior demanda por conta de peculiaridades na sua destinação final ou pela maior produtividade das máquinas para este produto. Por outro lado, deve-se monitorar o nível de pilha dos demais produtos não prioritários, de forma a não prejudicar a operação de recuperação por conta de empilhamento excessivo destes materiais. Frente a esta necessidade, são utilizados, de forma combinada, os conceitos de demanda relativa e tempo de estocagem; objetiva-se priorizar as pilhas com menor tempo de estocagem e com maior demanda relativa.

#### **3.2.3.2 Tempo de recuperação da pilha**

É o tempo demandado para a retomada de uma pilha, sendo determinado pela razão entre a massa da pilha e a taxa de recuperação da máquina que irá recuperar esta pilha. Além da

capacidade da máquina, outros fatores podem impactar na taxa de recuperação da pilha: tipo de minério, qualidade física e química do minério e condições meteorológicas, dentre outros.

### **3.2.3.3 Data de entrega da pilha**

De acordo com Slack (1992) e Slack et al (2003), uma boa estimativa do prazo de entrega é de grande importância para as organizações na obtenção de um bom desempenho. Para os processos de pátios de estocagem envolvendo pilhas de minério, o conceito de data de entrega pode se apoiar em diversos critérios. Tipicamente, define-se uma data de entrega com base no período de descanso de uma pilha antes da sua expedição. Já em sistemas de produção contínua, o conceito de data de entrega de uma pilha pode não ser tão útil, visto que uma produção poderá estar sendo direcionada para a expedição instante após a sua produção ou até de forma simultânea.

### **3.2.3.4 Tempo de mudança de pilha (*Setup*)**

Gilio (2007) afirma que tempos de *setup* compreendem o tempo de preparação de uma máquina para processar a tarefa seguinte, o qual inclui operações de agrupamento de ferramentas e limpeza de máquina. Os tempos de *setup* podem ser dependentes ou independentes da sequência de execução das tarefas. O *setup* independente ocorre quando este depende apenas da tarefa que espera por processamento. Quando o *setup* também depende da tarefa que foi processada anteriormente na máquina, é então considerado dependente. A assimetria ocorre quando o *setup* da tarefa  $i$  para a  $j$  é diferente do *setup* da tarefa  $j$  para  $i$  (FUCHIGAMI; MOCCELLIN, 2009). Wobeto (2008) também classifica os *setups* em *setup* para tarefas individuais (*non-batch setup*), quando envolve o tempo de troca entre diferentes tarefas e *setup* para lotes de tarefas (*batch setup*), quando existe tempo de troca entre diferentes agrupamentos de tarefas.

O tempo de *setup* pode ser afetado pelo tipo de equipamento utilizado nas operações de pátio. Conforme Chaves (2012), diferentes modelos de equipamentos poderão ser construídos de acordo com a complexidade dos processos e para atendimento de necessidades específicas de cada cliente. O mesmo autor destaca a importância dos processos de empilhamento e retomada de pilhas para as indústrias mineral e metalúrgica.

### **3.2.3.5 Qualidade do minério**

As questões relacionadas à qualidade estão presentes em todas as etapas do processo produtivo dos pátios de estocagem, abrangendo desde o empilhamento do minério no pátio até o seu embarque nos vagões (expedição). Normalmente, existem especificações de qualidade acordadas entre as áreas da mina, incluindo controle de qualidade, desenvolvimento de produto, relações comerciais e clientes (sejam eles internos ou externos). Tais especificações norteiam as diversas operações unitárias, de forma que os limites acordados de variação de qualidade para os diversos parâmetros (%Fe, %SiO<sub>2</sub>, %P, etc.) sejam respeitados. Além das especificações tradicionais, é bastante usual que sejam utilizados acordos internos de nível de serviço (*Service Level Agreement* - SLA) onde, para cada etapa no fluxo da cadeia produtiva, a qualidade seja controlada e possíveis desvios possam ser tratados de forma mais eficiente.

## **3.3. Método**

Esta seção detalha as etapas operacionais do método proposto para definição da ordem de retomada de pilhas.

### **3.3.1 Verificação das máquinas e pilhas a serem sequenciadas**

Nesta etapa, é avaliado o número de pilhas (tarefas) para recuperação e suas respectivas massas, o número de pátios em que as máquinas irão atuar e o número de máquinas existentes. Considere um sistema genérico composto por dois pátios (A e B) e duas máquinas

(M1 e M2) aptas a recuperarem pilhas de ambos os pátios conforme ilustrado na Figura 3.1. As pilhas que compõem o pátio A são identificadas por  $P_{A1}, P_{A2}, P_{A3}, \dots, P_{Ai}$ , enquanto que as pilhas pertencentes ao pátio B são descritas por  $P_{B1}, P_{B2}, P_{B3}, \dots, P_{Bj}$ . O método proposto pode ser estendido a qualquer número de máquinas e pilhas.

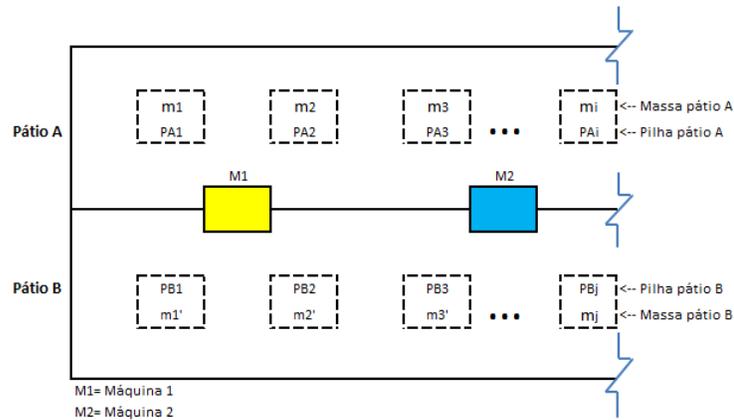


Figura 3.1 – Representação esquemática dos pátios, pilhas e recuperadoras.

### 3.3.2 Alocação das pilhas às máquinas em função de suas capacidades

Nesta etapa, o número de pilhas alocadas às máquinas é determinado em função da capacidade de recuperação destas máquinas. Considere as capacidades das máquinas M1 e M2 como  $CapM1$  e  $CapM2$ , respectivamente; o número total de pilhas nos pátios A e B é  $n$ . O número de pilhas a serem alocadas às máquinas M1 e M2,  $QM1$  e  $QM2$ , respectivamente, é definido pelas equações (4) e (5).

$$QM1 = n \cdot \left[ \frac{CapM1}{CapM1 + CapM2} \right] \quad (4)$$

$$QM2 = n \cdot \left[ \frac{CapM2}{CapM1 + CapM2} \right] \quad (5)$$

Em seguida, para a escolha das pilhas, as máquinas partirão de uma posição inicial nos extremos do pátio, movendo-se em direção ao centro do pátio e varrendo o número de pilhas

definido pelas equações (4) e (5), conforme ilustrado na Figura 3.2. Tal sistemática pode ser estendida para cenários onde um maior número de recuperadoras é disponível. Neste caso, duas seriam posicionadas nos extremos do pátio, e as demais seriam proporcionalmente distribuídas no interior do pátio.

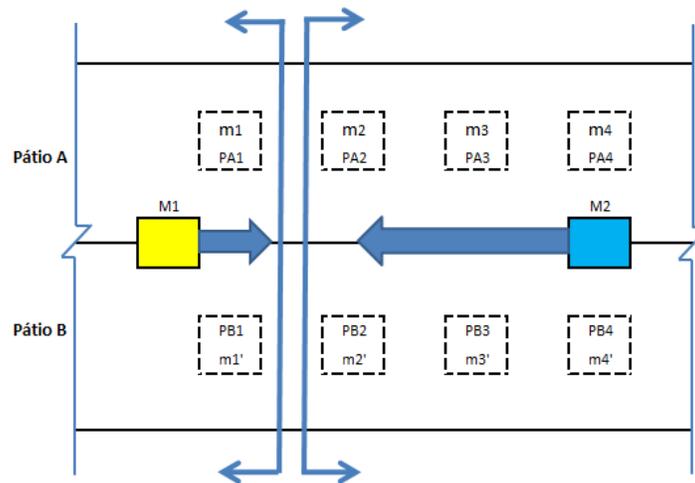


Figura 3.2 – Alocação das pilhas no pátio às máquinas M1 e M2

Algumas pilhas poderão pertencer tanto à máquina M1 quanto à máquina M2 dependendo da disposição destas no pátio. Sugere-se então a alocação da pilha de maior massa à máquina de maior capacidade.

### 3.3.3 Cálculo dos coeficientes $w_j$ e $p_j$

Inicialmente, calcula-se o tempo de estocagem do produto para cada pilha no pátio, conforme a equação (6). Para tanto, deve-se coletar as massas de cada pilha e a sua capacidade de estocagem, conforme mostrado no Quadro 3.1.

$$TempoEst = \frac{CapEst - MassaPilha}{CapRecPilha} \quad (6)$$

Onde  $CapEst$  é a capacidade de estocagem de cada pilha  $i$ ;  $MassaPilha$  é a massa de cada pilha  $i$ ; e  $CapRecPilha$  é a capacidade de recuperação da pilha.

Quadro 3.1 – Pilhas, produtos, massas estocadas e capacidade das pilhas.

Pilha	Massa Estocada (t)	Capacidade Estocagem (t)
P1	m1	m'1
P2	m2	m'2
...	m <sub>j</sub>	m' <sub>j</sub>

O coeficiente  $w_j$  é calculado em função do tempo de estocagem disponível para as pilhas nos pátios e da demanda relativa deste produto na expedição. Para fins de ilustração, considere que existam dois produtos (X e Y) em um pátio, e que suas demandas sejam de 60 e 20 toneladas por dia, respectivamente. Sendo assim, tem-se 75% de demanda para o produto X e 25% para o produto Y. A equação (7) define o coeficiente  $w_j$  para as pilhas a serem recuperadas.

$$w_j = \frac{1}{TempoEst} \cdot DemandaRel \quad (7)$$

Onde  $TempoEst$  é o tempo de estocagem da pilha; e  $DemandaRel$  é a demanda relativa do produto.

Por sua vez,  $p_j$ , tempo de recuperação da pilha, é obtido pela razão entre a massa da pilha e a capacidade de recuperação desta pilha. A equação (8) define o cálculo do  $p_j$  para as pilhas.

$$p_j = \frac{MassaPilha}{CapRecPilha} \quad (8)$$

### 3.3.4 Construção da matriz de tempo de mudança de pilha (Matriz Setup)

A matriz de *setup* avalia as possibilidades de mudanças entre pilhas e seus respectivos tempos ( $S_i$ ), conforme ilustrado na Figura 3.3. Tais dados são extraídos de medições diretas de tempo de movimentação de máquinas recuperadoras entre pilhas.

		Para			
		P3	P4	P5	
De	P3	-	S4	S5	•••
	P4	S1	-	S6	•••
	P5	S2	S3	-	•••
		• •	• •	• •	

Figura 3.3 – Matriz *setup* com os valores dos tempos ( $S_i$ )

A matriz de *setup* pode contemplar outros fatores que influenciam no deslocamento entre pilhas, os quais incluem restrições de mudança entre pilhas ou bloqueio físico decorrente de procedimentos de manutenção ou outros. Tais fatores são quantificados por especialistas de processo e adicionados à distância que separa as pilhas no pátio, para posterior inserção na matriz de *setup*.

### 3.3.5 Cálculo do índice de qualidade das pilhas ( $Q_i$ )

Nesta etapa, os índices de qualidade das pilhas são calculados através das equações (9) e (10) as quais são adaptadas da função perda de Taguchi.

$$Q_i = OQE = 10 - K(\text{Meta} - x_i)^2 \quad (9)$$

$$K = \frac{10}{(\text{Meta} - \text{Limite})^2} \quad (10)$$

Onde OQE é o *Overall Quality of Production Effectiveness* (Qualidade Global Efetiva);  $K$  é o coeficiente de perda; Meta é a meta da especificação do parâmetro; e Limite são os limites inferior ou superior (LIE ou LSE) de qualidade do parâmetro.

Para o cálculo do índice de qualidade, são considerados somente valores maiores ou iguais a 1, justificado pelo fato deste valor participar da equação do índice de prioridade como um

elemento de multiplicação (sendo o número 1 um elemento neutro). Portanto, valores de OQE menores que 1 são arredondados a esse valor.

### 3.3.6 Sequenciamento das pilhas através do ATCSM

O índice de ordenamento ( $I_j$ ) do ATCSM permite definir a próxima pilha a ser recuperada, priorizando de forma conjunta: (i) pilhas com menor tempo de estocagem no pátio e maior demanda relativa representados pelo coeficiente ( $w_j$ ); (ii) pilhas com menor tempo de recuperação ( $p_j$ ); (iii) pilhas com data mais próxima de entrega ( $d_j$ ), ou seja, menor folga; (iv) pilhas que demandam menor deslocamento da recuperadora em relação à sua posição atual (movendo-se de uma pilha para outra), e (v) pilhas com maior índice de qualidade ( $Q_i$ ). Quanto maior o ( $I_j$ ) de uma pilha  $j$  na equação (11), maior será sua prioridade na recuperação.

$$I_j = \frac{w_j}{p_j} \times \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{\bar{p}}\right) \times \exp\left(-\frac{S_i}{\bar{s}}\right) \times Q_i \quad (11)$$

Onde  $w_j$  é a priorização de recuperação da pilha baseada no tempo de estocagem e na demanda relativa;  $p_j$  é o tempo de recuperação da pilha;  $d_j$  é a data de entrega;  $t$  é o tempo decorrido desde a primeira iteração;  $\bar{p}$  é o tempo médio de processamento da máquina destinada à recuperação de uma pilha (ou seja, é a razão entre as massas de todas as pilhas escolhidas por uma máquina e a capacidade da mesma);  $\bar{s}$  é o tempo médio de *setup* de uma máquina considerando a pilha atual como origem e as pilhas que poderão ser escolhidas;  $S_i$  é o tempo de *setup* e o  $Q_i$  é o índice de qualidade das pilhas. Para definição da pilha seguinte a ser recuperada, deve-se somar o tempo decorrido ao coeficiente ( $t$ ) e aplicar novamente a equação (11).

### 3.4. Aplicação a um sistema de recuperação de minério

A sistemática proposta é aplicada em um pátio de estocagem na mina de Carajás, a qual iniciou suas operações de extração em 1985. Atualmente esta mina é considerada a maior mina de ferro a céu aberto no mundo; sua produção anual é de aproximadamente 110 milhões de toneladas métricas.

Para a aplicação do método proposto será considerado um sistema composto por dois pátios (A e B), com duas máquinas recuperadoras (M1 e M2) e doze pilhas (sendo cada pilha representada por  $PA_j$  e  $PB_j$ , onde  $A$  e  $B$  indicam o pátio de origem e  $j$  a identificação da pilha). As capacidades das recuperadoras (M1 e M2) são, respectivamente, 100 ton./min e 133 ton./min. A Figura 3.4 ilustra a configuração do pátio, especificando o volume de minério em cada pilha (massas em toneladas).

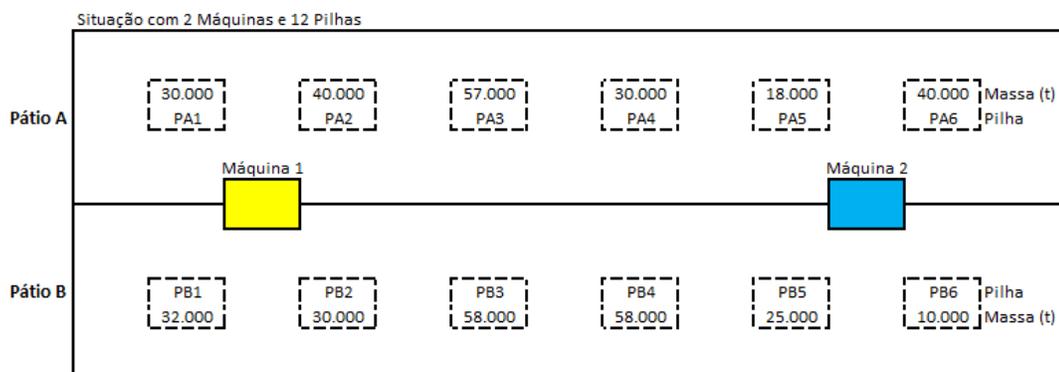


Figura 3.4 – Representação dos pátios, pilhas e suas massas e recuperadoras.

O número de pilhas alocadas para cada máquina (M1 e M2) é definido através das equações (4) e (5), as quais recomendam a atribuição de 5 pilhas à M1 e 7 pilhas à M2. Tal alocação gerou o cenário ilustrado na Figura 3.5.

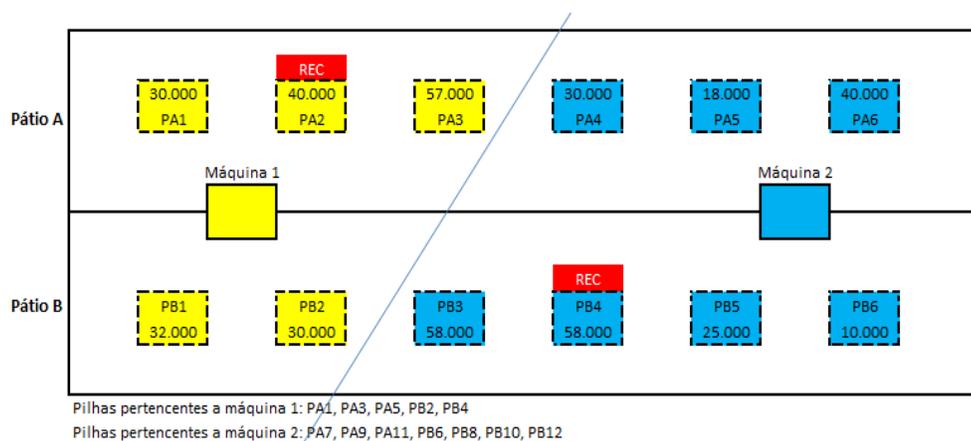


Figura 3.5 – Atribuição das pilhas às máquinas

Devido às suas posições nos pátios, as pilhas  $P_A3$  e  $P_B3$  poderiam ter sido alocadas tanto para a M1 quanto para M2 e, conforme sugerido em (3.3.2), a pilha com maior massa ( $P_B3 = 53$  toneladas) foi alocada para a máquina de maior capacidade ( $M2 = 133$  ton./min). As pilhas  $P_A2$  e  $P_B4$  são as pilhas de partida do modelo, ou seja, são consideradas as pilhas inicialmente em recuperação (REC).

A Tabela 3.1 sumariza as pilhas de acordo com o tipo de minério (X e Y), e as respectivas massas estocadas e capacidades de estocagem em toneladas.

Tabela 3.1 – Pilhas, produtos, massas estocadas e capacidades.

Pilha	Produto	Massa Estocada (t)	Capacidade Estocagem (t)
PA1	X	30.000	60.000
PA2	X	40.000	60.000
PA3	X	57.000	60.000
PA4	Y	30.000	60.000
PA5	X	18.000	60.000
PA6	X	40.000	60.000
PB1	X	32.000	60.000
PB2	X	30.000	60.000
PB3	Y	58.000	60.000
PB4	X	58.000	60.000
PB5	X	25.000	60.000
PB6	X	10.000	60.000

O tempo de estocagem das pilhas com base nos seus respectivos produtos é calculado através da equação (6), sendo os resultados apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Tempos de estocagem das pilhas

Pilha	Tempo Estocagem (min)	Pilha	Tempo Estocagem (min)
PA1	300	PB1	280
PA2	200	PB2	300
PA3	30	PB3	15
PA4	226	PB4	15
PA5	316	PB5	263
PA6	150	PB6	376

O coeficiente  $w_j$  vale-se da equação (7), sendo considerada uma demanda relativa de 80% para o produto X e 20% para o produto Y. O coeficiente  $p_j$  considera as capacidades das máquinas M1 e M2 iguais a 100 ton./min e 133 ton./min, respectivamente. A tabela 3.3 apresenta os coeficientes  $W_j$ ,  $P_j$  e as datas de entrega para as pilhas ( $d_j$ ).

Tabela 3.3 – Coeficientes  $w_j$ ,  $p_j$  e  $d_j$ 

Pilha	$w_j$	$p_j$	$d_j$
PA1	2,67E-03	300	3.900
PA2	4,00E-03	400	400
PA3	2,67E-02	570	570
PA4	8,87E-04	226	226
PA5	2,53E-03	135	135
PA6	5,32E-03	301	301
PB1	2,86E-03	320	320
PB2	2,67E-03	300	300
PB3	1,33E-02	436	436
PB4	5,32E-02	436	436
PB5	3,04E-03	188	188
PB6	2,13E-03	75	75

Na sequência, construiu-se uma matriz de tempos de deslocamento entre pilhas (matriz *setup*), apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Matriz *setup* com os valores dos tempos em minutos ( $S_i$ ).

Pilhas	Matriz de tempo de preparação ( <i>setup</i> ) em minutos											
	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6
PA1	-	7	5	12	10	17	15	22	20	27	25	32
PA2	7	-	12	5	17	10	22	15	27	20	32	25
PA3	5	12	-	7	5	12	10	17	15	22	20	27
PA4	12	5	7	-	12	5	17	10	22	15	27	20
PA5	10	17	5	12	-	7	5	12	10	17	15	22
PA6	17	10	12	5	7	-	12	5	17	10	22	15
PB1	15	22	10	17	5	12	-	7	5	12	10	17
PB2	22	15	17	10	12	5	7	-	12	5	17	10
PB3	20	27	15	22	10	17	5	12	-	7	5	12
PB4	27	20	22	15	17	10	12	5	7	-	12	5
PB5	25	32	20	27	15	22	10	17	5	12	-	7
PB6	32	25	27	20	22	15	17	10	12	5	7	-

O parâmetro de qualidade das pilhas a serem recuperadas é avaliado através do percentual de SiO<sub>2</sub> das pilhas, conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Teor de sílica (%SiO<sub>2</sub>) das pilhas no pátio

Pilha	%SiO <sub>2</sub>	Pilha	%SiO <sub>2</sub>
PA1	4,10	PB1	2,32
PA2	2,55	PB2	3,65
PA3	1,56	PB3	3,20
PA4	2,87	PB4	2,30
PA5	3,60	PB5	4,20
PA6	2,07	PB6	5,00

Considerando-se as especificações de % SiO<sub>2</sub> para o produto X (Meta = 2,90; LIE = 2,10 e LSE = 3,70) e Y (Meta = 3,70; LIE = 2,60 e LSE = 4,80), obtêm-se, para ambos os produtos com base nas equações (9) e (10), os valores de K ( $K_X = 15,63$  e  $K_Y = 8,26$ ). Os índices de qualidade ( $Q_i$ ) são sumarizados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Índice de qualidade das pilhas nos pátios

Pilha	%SiO <sub>2</sub>	Produto	LSE	Meta	LIE	K	$Q_j$
PA1	4,10	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>1,00</b>
PA2	2,55	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>8,09</b>
PA3	1,56	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>1,00</b>
PA4	2,87	Y	4,80	3,70	2,60	8,26	<b>4,31</b>
PA5	3,60	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>2,34</b>
PA6	2,07	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>1,00</b>
PB1	2,32	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>4,74</b>
PB2	3,65	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>1,21</b>
PB3	3,20	Y	4,80	3,70	2,60	8,26	<b>7,93</b>
PB4	2,30	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>4,38</b>
PB5	4,20	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>1,00</b>
PB6	5,00	X	3,70	2,90	2,10	15,63	<b>1,00</b>

Por fim, a Tabela 3.7 ilustra os valores de  $I_j$  gerados pela regra ATCSM [equação (11)]. A coluna priorização refere-se à razão  $w_j/p_j$ ; a coluna Data traz o resultado do primeiro termo exponencial da equação (11), quantificando a folga de recuperação da pilha frente à sua data de entrega; a coluna Setup refere-se ao segundo termo exponencial, o qual penaliza a movimentação da recuperadora a pilhas mais distantes; a coluna Qualidade denota o índice de qualidade ( $Q_i$ ) baseada no percentual de SiO<sub>2</sub> das pilhas a serem recuperadas.

Tabela 3.7– Cálculo do índice de classificação das pilhas.

	Pilha	Priorização	Data	Setup	Qualidade	I (j)
Máquina M1	PA2	-	-	-	-	-
	PA1	8,89E-06	7,31E-05	0,670	1,00	4,35E-10
	PA3	4,68E-05	4,91E-05	0,503	1,00	1,16E-09
	PB1	8,93E-06	2,54E-05	0,284	4,74	3,05E-10
	PB2	8,89E-06	2,41E-05	0,423	1,21	1,10E-10
Máquina M2	PB4	-	-	-	-	-
	PA4	3,93E-06	2,94E-06	0,338	4,31	1,68E-11
	PA5	1,87E-05	3,63E-05	0,292	2,34	4,65E-10
	PA6	1,77E-05	3,59E-06	0,485	1,00	3,08E-11
	PB3	3,05E-05	7,84E-06	0,603	7,93	1,14E-09
	PB5	1,62E-05	1,79E-05	0,420	1,00	1,21E-10
	PB6	2,83E-05	1,98E-06	0,696	1,00	3,89E-11

Como resultado da primeira iteração, as pilhas escolhidas para as máquinas M1 e M2 foram  $P_A3$  e  $P_B3$ , respectivamente. A sequência sugerida pela sistemática proposta foi considerada coerente pelos especialistas de processo. Em relação à máquina M1, apesar da pilha  $P_A1$  ter se mostrada prioritária em sua parcela referente à de data de entrega ( $7,31 \times 10^{-5}$ ) e tempo de setup (0,670) e a pilha  $P_B1$  ter se destacado em termos de qualidade (4,74), a relação  $\frac{w_i}{p_i}$  para a pilha  $P_A3$  é cinco vezes maior que a pilha  $P_A1$  ( $4,68 \times 10^{-5}$  contra  $8,89 \times 10^{-6}$ ), justificando assim a escolha da pilha PA3. Para a máquina M2, as parcelas da equação referente à data de entrega e tempo de setup se mostraram prioritárias para as pilhas  $P_A5$  e  $P_B6$  com valores  $3,63 \times 10^{-5}$  e 0,696, respectivamente. Entretanto, as parcelas referentes à relação  $\frac{w_i}{p_i}$  e índice de qualidade se mostraram preponderantes para a escolha da pilha  $P_B3$  com valores  $3,05 \times 10^{-5}$  e 7,93. A sequência de recuperação gerada para as demais pilhas e suas respectivas máquinas é:  $M1 = P_B1, P_A1$  e  $P_B2$ ;  $M2 = P_A5, P_B5, P_B6, P_A6$  e  $P_A4$ .

### 3.5. Conclusão

Neste artigo foi proposta uma modificação na heurística ATCS para sequenciamento de pilhas de minério no pátio de estocagem, a ATCSM. Tal heurística apoia-se em critérios tidos como importantes para o desempenho operacional dos processos de pátio, os quais incluem capacidade das recuperadoras, tempo de estocagem, demanda dos produtos, tempo de recuperação das pilhas, data de entrega das pilhas, tempo de mudança entre pilhas (*setup*) e qualidade do minério. A inserção de tais fatores na regra ATCSM proposta permite reduzir diversos problemas de processo associados à alta variabilidade da qualidade no produto final, desperdício de tempo com longas manobras no pátio, problemas relacionados ao manuseio do produto (*handling*), desperdício de tempo com priorização de pilhas com baixas demandas e risco de parada da produção devido à falta de espaço nos pátios.

Quando aplicada no processo de recuperação da mina de Carajás, a ATCSM gerou uma sequência de recuperação tida como coerente pelos especialistas de processo. De tal forma, é esperado que a aplicação contínua da heurística proposta beneficie os processos da mina, principalmente em termos de aumento da qualidade do produto final, produtividade de toda cadeia e, conseqüentemente, na redução dos custos operacionais. Espera-se também que esta heurística não fique restrita somente à área de mineração, sendo estendida a outras áreas de aplicação.

Para futuras pesquisas na área de pátios de estocagem de minérios, sugerem-se novas adaptações das regras de despacho ATC para aplicação em cenários de mineração. Entende-se a regra ATC como estruturalmente simples e eficiente nos resultados obtidos.

## Referências

- BOLAND, N., DUMITRESCU, FLOYLAND, G., and GLEIXNER, A. M. (2009). **LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity**. *Computers & Operations Research*, 36, 1064-1089.
- CAREY, M. (1994). **Extending a train pathing model from one-way to two-way track**. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(5), 395-400.
- CHAVES, A. P., **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Manuseio de Sólidos e Granulados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CULLENBINE, C., Wood, R. K., and NEWMAN, A., (2011). **A Sliding Time-Window Heuristic for Open Pit Mine Block Sequencing**. *Optimization Letters*, 5, pp. 365-377.
- DAVIS. M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos de Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Bookman. Porto Alegre, 2001.
- FUCHIGAMI, H. Y.; MOCCELLIN, J. V. **Regras de prioridade para programação em sistemas flexível flow line com tempos de setup dependentes da sequência**. In: *Anais...SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (XVI SIMPEP)*, 17, 2009. Bauru, SP
- GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. 8. ed. São Paulo: Pioneira, 2002.
- GILIO, N. C. **Método heurístico para o problema de no-wait flow shop com setup separado e independente da sequência**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.
- LEE, Y. H., BRASKARAN, K. and PINEDO, M. **A heuristic to minimize the Total Weighted Tardiness with Sequence-dependent Setups**, *IIE Transactions* (29), pp. 45-52 (1997).
- LIU, S. Q., and KOSAN, E. (2009). **Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem**. *Computers & Operations Research*, 36, 2840-2852.

MESQUITA, M.; COSTA, H. G.; LUSTOSA, L.; SILVA, A. S. Programação detalhada da produção. In: LUSTOSA, L. J.; MESQUITA, M. A.; QUELHAS, O.; OLIVEIRA, R. **Planejamento e Controle da Produção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

MONKS, J. G. **Administração da Produção**. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.

N. RAMAN, R. V. RACHAMADUGU and F. B. Talbot, **Real Time Scheduling in an Automated Manufacturing Center**, European Journal of Operational Research, (40), pp. 222-242 (1989). (pág. 11, 15).

PINEDO, Michael, 2008. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems** – 3<sup>a</sup> ed., New Jersey, Prentice Hall.

REID, R. D.; SANDERS, N. R. **Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

SLACK, N. **The Manufacturing Advantage: Achieving Competitive Manufacturing Operations**. Mercury Books, 1992.

SLACK, N., CHAMBERS, S. & JOHNSTON, R. **Operations Management**. Pearson Education Canada, 4<sup>th</sup> Ed., 2003.

TAGUCHI, G., “**Off-line and On-line Quality Control Systems.**” Proceedings of the International Conference on Quality Control, B4, Tokyo, Japan, 1978.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática**. São Paulo: Atlas. 2007.

VALE. Sistema Norte – **Processos das Minas de Ferro e Manganês e Atividades do Turno GADAN**. 2008. Relatórios internos.

VEPSALAINEN, A. e MORTON, T. E. **Priority Rules and Lead Time Estimation for Job Shop Scheduling with Weighted Tardiness Costs** - *Management Science*, 33, pp.1036-1047, 1987.

WOBETO, E. I. **Uma abordagem heurística para o problema de planejamento da produção em fundições – estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A programação de tarefas (sequenciamento) exerce uma função de grande importância nas organizações, visto que é um processo de decisão que promove impactos significativos no desempenho operacional e financeiro das mesmas. Neste contexto, os artigos apresentados nesta dissertação abordaram heurísticas de sequenciamento apoiadas em fatores considerados fundamentais para as operações de recuperação de minério em pátios de estocagem.

No primeiro artigo, foi apresentada uma nova heurística de sequenciamento para a retomada de pilhas de minério em pátios de estocagem através do desenvolvimento de um índice de prioridade (IP). Para tanto, utilizam-se critérios que impactam no processo de retomada de pilhas de minério, os quais incluem qualidade do minério, equilíbrio de massa entre os pátios, tempo de trânsito das máquinas recuperadoras entre as pilhas (*setup*) e tempo de residência.

Por sua vez, o segundo artigo apresentou uma modificação da heurística ATCS para o sequenciamento de pilhas de minério em pátios de estocagem, a ATCSM. Tal heurística também apoia-se em critérios tidos como importantes para o desempenho operacional do sistema de recuperação de minério em pátios de estocagem, os quais incluem capacidade das recuperadoras, tempo de estocagem, demanda dos produtos, tempo de recuperação das pilhas, data de entrega das pilhas, tempo de mudança entre pilhas (*setup*) e qualidade do minério.

As heurísticas de sequenciamento propostas por ambos os artigos apresentaram sequências de recuperação consideradas coerentes pelos técnicos e especialistas de processo. Em aspecto prático, é esperado que a aplicação contínua destas heurísticas beneficie os processos de estocagem e recuperação de pilhas, principalmente em termos de melhoria na qualidade do minério e redução de sua variabilidade, na produtividade da cadeia produtiva e, conseqüentemente, na redução dos custos operacionais. As heurísticas aqui apresentadas podem ser estendidas para outras áreas da mina mediante ajustes pontuais.

Para futuras pesquisas, sugere-se uma heurística de recuperação de pilhas de minério nos pátios de estocagem que considere a relação de dependência entre as máquinas recuperadoras nos pátios, estudando possíveis impactos causados por tal dependência na flexibilidade operacional, custos relacionados às potenciais modificações e qualidade da mistura final do minério. Outra sugestão consiste na introdução de outros fatores tidos como relevantes na regra ATCS.