

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

Fabiano Della Libera da Silva¹

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-chave: Heurística; ATCSM; ATCS; Sequenciamento; Pátios de estocagem.

MODIFICATION OF ATCS HEURISTIC FOR RECLAIMING ORE PILES IN STOCKYARDS

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; Scheduling; Stockyards.

¹ Engenheiro de Produção Civil, Mestrado Profissional em Produção Mineral, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

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

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Vepsalainen e Morton [1], 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 máx. $(d_j - p_j - t, 0)$, 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.

Em Raman et al. [2] 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. [3] 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 [4] 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.

3.3 Método

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 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.

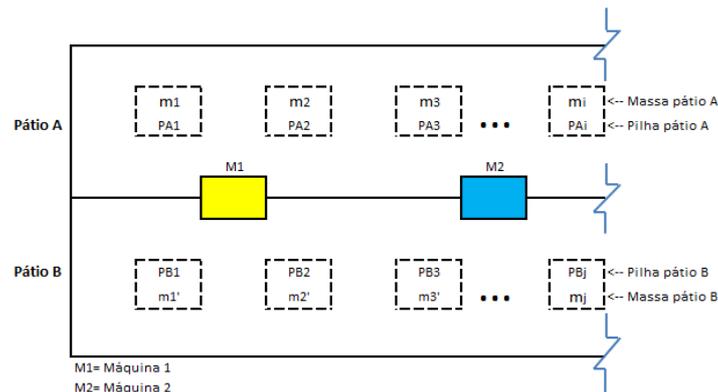


Figura 1 – Representação esquemática dos pátios, pilhas e recuperadoras.

3.3.2 Alocação das pilhas às máquinas em função da capacidade

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 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.

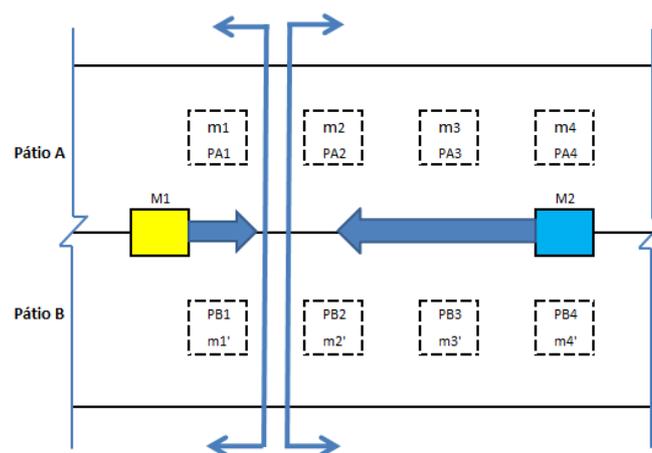


Figura 2 – Alocação das pilhas no pátio às máquinas M1 e M2

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 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 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 _j	m' _j

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 mudança de pilhas (*setup*)

A matriz de *setup* avalia as possibilidades de mudanças entre pilhas e seus respectivos tempos (S_i), conforme ilustrado na Figura 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 – 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.

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

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

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 4 ilustra a configuração do pátio, especificando o volume de minério em cada pilha (massas em toneladas).

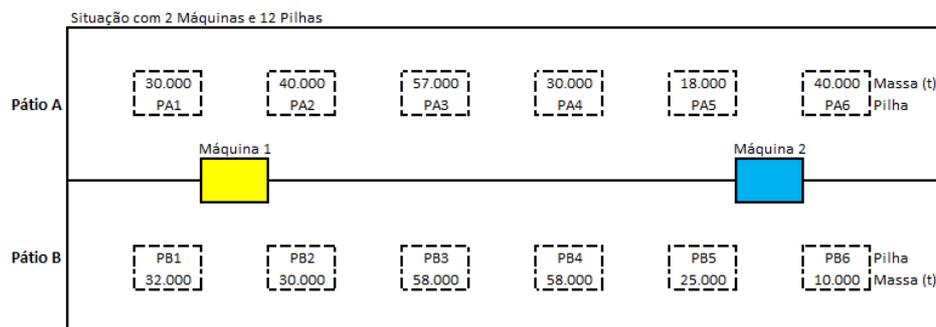


Figura 4 – Representação dos pátios, pilhas e suas massas e recuperadoras.

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 5.

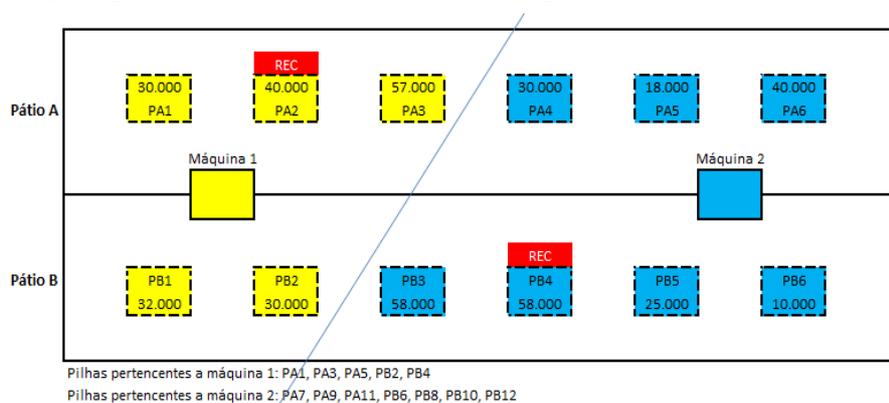


Figura 5 – Atribuição das pilhas às máquinas

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 2 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 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 2.

Tabela 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 apresenta os coeficientes W_j , P_j e as datas de entrega para as pilhas (d_j).

Tabela 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 4.

Tabela 4 – Matriz *setup* com os valores dos tempos em minutos (Si).

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 SiO₂ das pilhas, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Teor de sílica (%SiO₂) das pilhas no pátio

Pilha	%SiO ₂	Pilha	%SiO ₂
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 % SiO₂ 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 6.

Tabela 6 – Índice de qualidade das pilhas nos pátios

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

Por fim, a Tabela 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 SiO₂ das pilhas a serem recuperadas.

Tabela 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} .

4 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

- 1 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.
- 2 N. Raman, R. V. Rachamadugu and F. B. Talbot, Real Time Scheduling of an Automated Manufacturing Center, *European Journal of Operational Research*, (40), pp. 222-242 (1989). (pág. 11, 15).
- 3 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).
- 4 Pinedo, Michael, 2008. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* – 3ª ed., New Jersey, Prentice Hall.