

MODELAGEM DO FLUXO DE MINÉRIO DA BRITAGEM E CARREGAMENTO DE PRODUTOS DE UMA MINA NO SOFTWARE ARENA®

N. R. S. MACHADO, I. E. CABRAL, V. K. ALVES, B. D. ASSIS

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0129-8681>*

nayaramachado13@yahoo.com.br

Submetido 21/10/2020 - Aceito 01/12/2023

DOI: 10.15628/holos.2023.11433

RESUMO

A britagem é um processo integrante e indispensável da produção mineral, pois permite agregar valor ao produto, uma vez que adequa a granulometria do minério para posterior beneficiamento na usina. Neste trabalho, o transporte da bauxita, a partir dos pátios de estocagem, é realizado por trens até o porto de embarque, processo esse que demanda ajustes de tempo e de eficiência de carregamento. Dessa forma, neste estudo, foram

desenvolvidos modelos de simulação dos processos de britagem e carregamento de vagões no software Arena® para validação do sistema de produção de uma mineração. Os modelos de carregamento apresentaram resultados próximos dos reais, portanto, foram validados. Os modelos de britagem foram considerados válidos por fornecerem resultados coerentes após serem testados em diferentes cenários.

PALAVRAS-CHAVE: bauxita, britagem, carregamento de vagões, modelos de simulação, Arena®.

MODELING OF CRUSHING ORE FLOW AND LOADING PRODUCTS FROM A MINE IN THE ARENA® SOFTWARE

ABSTRACT

Crushing is an integral and indispensable process of mineral production, as it adds value to the product by reducing the ore granulometry for subsequent processing in the plant. Bauxite is transported by trains from the storage yards to the shipping port, which requires time and loading efficiency adjustments. Thus, in this study, simulation models of the crushing and loading wagons

processes were developed in the Arena® software to validate a mining production system. The loading models presented results close to the real ones and therefore were validated. Crushing models were considered valid for providing consistent results after being tested in different scenarios.

KEYWORDS: bauxite, crushing, loading wagons, simulation models, Arena®.

1 INTRODUÇÃO

O uso de ferramentas matemáticas tem sido amplamente difundidos nos últimos anos, como também sua utilização no ambiente industrial, contribuindo para melhorias no processo de produção de modo a evitar gastos excessivos de recursos e desperdícios de produção (WAVRZYNCZAK, ULBRICHT & TEIXEIRA, 2015).

Nesse âmbito, a Pesquisa Operacional, ou PO, é um conjunto de técnicas quantitativas que auxilia a tomada de decisão. Uma dessas técnicas é a simulação de sistemas a eventos discretos.

O uso de modelos de simulação pode possibilitar o processo de análise de tomada de decisões, como uma forma de analisar e testar diversos cenários, para que uma tomada de decisão seja avaliada antes de ser implementada em um sistema real (ANDRADE, 2004).

Inicialmente, os sistemas de simulação foram desenvolvidos sobre linguagens de propósito geral, tais como Forlan, Basic e Pascal. Entretanto isso exigia profissionais altamente qualificados em programação de computadores e um esforço maior na construção de modelos. Dessa maneira, começaram a surgir linguagens de programação que superassem essa barreira, sendo o caso das linguagens Gpss, Siman, Slan, etc. Essas linguagens eram, na verdade, bibliotecas formadas por conjuntos de macro comandos das linguagens de propósito gerais. Alguns dos simuladores da geração seguinte foram desenvolvidos sobre a plataforma dessas linguagens. Como exemplo tem-se o software Arena®, implementado na linguagem Siman (KELTON & SADOWSKI, 1998 apud SANTOS & ALVES, 2014).

A simulação de sistemas a eventos discretos é uma técnica da PO que estuda o desempenho de um determinado sistema através de modelos, implementado em softwares, que reproduz na totalidade ou em parte as propriedades e comportamentos do sistema de forma virtual, permitindo sua manipulação e estudo detalhado (PARAGON, 2006).

O software ARENA é um ambiente gráfico integrado de simulação, que contém recursos para modelagem, animação, análise estatística e análise de resultados (PARAGON, 2006).

Indústrias minerais vem se utilizando cada vez mais desses meios para evitar riscos de investimentos que, às vezes podem parecer adequados e viáveis, mas após a implementação não correspondem às expectativas da equipe.

A mineração possui sistemas extremamente complexos, apresentando grande número de variáveis aleatórias. Quando se realiza a simulação de algumas operações, conseqüentemente é feito um gerenciamento das mesmas e a otimização do processo. Com a simulação pode-se analisar cenários diferentes com baixo custo e de forma rápida.

Neste estudo, foram criados modelos de simulação referentes ao fluxo de minério nas operações de britagem e carregamento de produtos em vagões de trens para posterior transporte até um porto de uma mineração de bauxita, no intuito de se tentar reproduzir o cenário atual de como tais operações realmente ocorrem, para que depois possam ser utilizados para análise e previsão de comportamento do sistema diante de cenários futuros ou alternativos.

Os processos de britagem e de carregamento são de elevada relevância para o empreendimento mineiro, o que justifica o estudo de seus comportamentos através de modelos de simulação. Neste trabalho, os modelos foram construídos utilizando-se o software ARENA.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A prática da modelagem pode ser desenvolvida para a expansão da produção, troca de equipamentos ou adição de novos produtos, dentre outras aplicações. A fim de dimensionar adequadamente um sistema, deve-se analisar os principais gargalos, ou seja, onde podem ocorrer filas. Recomenda-se também realizar a montagem de um novo sistema no qual planeja-se o fluxo ótimo dentro do mesmo (PRADO, 2004).

Um sistema pode ser considerado como um conjunto de elementos, ou entidades, que podem atuar ou interagir com outros elementos para a execução de uma ou mais atividades que levam um certo tempo de duração. Estas atividades proporcionam uma mudança de estado do sistema.

O estado de um sistema pode ser definido por valores assumidos por uma série de variáveis em um determinado instante do tempo, as quais podem ser denominadas variáveis de estado do sistema. Caso uma destas variáveis modifique o valor, diz-se que ocorreu uma mudança de estado. Estas mudanças de estados ocorrem quando se inicia ou termina uma atividade da qual participam uma ou mais entidades. Se durante um intervalo de tempo, nenhuma destas variáveis sofrem alterações, nenhuma mudança de estado acontece. Logo, as mudanças de estado ocorrem em instantes discretos do tempo, por isso é intitulada de simulação a eventos discretos.

Como o tempo de duração das atividades, em geral, é uma variável aleatória, além de outros tipos de variáveis aleatórias que podem estar presentes no sistema a simular, não é possível determinar de antemão o momento em que as mudanças de estados vão ocorrer, conseqüentemente, impossibilitando tratar sistemas deste tipo através de modelos determinísticos. Este tipo de simulação é indicado para representar sistemas cujos comportamentos dependem de uma ou uma série de variáveis aleatórias.

O programa de simulação deve acompanhar então a trilha das entidades dentro do sistema, identificando em sequência todos os instantes em que as mudanças de estado ocorrem e registrando todas as alterações destas trocas de estado. O comportamento final do sistema será o resultado da sequência de mudanças de estado pelas quais o sistema passa desde o instante inicial até o instante final da simulação.

Os elementos básicos intrínsecos ao modelo de simulação são: Entidades, Atributos, Variáveis, Filas, Recursos, Relógio de simulação e Eventos.

Informações sobre o software ARENA utilizado neste trabalho podem ser encontradas em PRADO, (1999).

3 METODOLOGIA

As seguintes fases normalmente estão presentes em um estudo de simulação: 1. Definição do problema; 2. Identificação das variáveis relevantes; 3. Coletas de dados; 4. Formulação do

modelo lógico-matemático; 5. Construção do modelo computacional; 6. Verificação e validação do modelo; 7. Experimentação.

A caracterização do problema com as variáveis relevantes e dados dos processos é feita a seguir através da descrição das operações de britagem e de carregamento de vagões. Existem dois tipos de produtos, a bauxita bruta e bauxita lavada. A bauxita bruta só passa pelo processo de britagem. Já a bauxita designada lavada, após a britagem passa por uma usina de beneficiamento.

A britagem possui inúmeras operações e, com a intenção de facilitar a visualização das mesmas, foram construídos fluxogramas e fluxos de decisão, a fim de facilitar a compreensão das operações.

Processo de Britagem

A bauxita extraída na lavra ou das pilhas intermediárias de estocagem (pilhas pulmão) é descarregada na moega pelos caminhões ou pás-carregadeiras respectivamente. Após esse processo, o minério é transportado através de um alimentador de sapatas até o britador primário. O minério é transferido do britador primário para o britador secundário pela ação da gravidade, não havendo nenhum equipamento intermediário entre os britadores. Logo, o minério é encaminhado à primeira correia do processo. Na Figura 1, pode-se visualizar o processo:

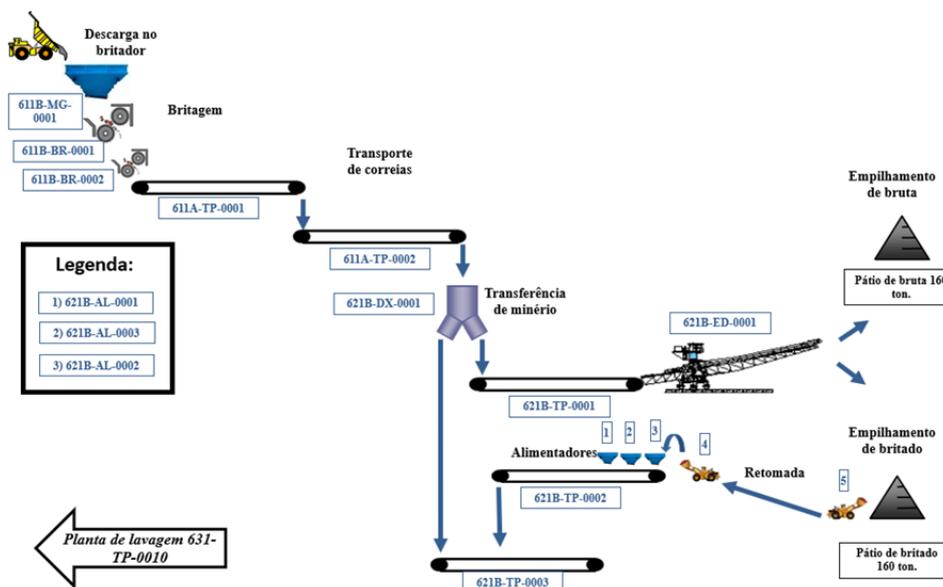


Figura 1: Fluxograma da britagem.

O material segue para o segundo transportador de correia, sendo enviado até o desviador de fluxo motorizado. O desviador de fluxo quando posicionado para a direita, realiza a alimentação da usina. Quando posicionado para a esquerda, o minério é direcionado para seguir rota de empilhamento no pátio de estocagem.

Estocagem e By-Pass no Pátio de Bauxita Britada

O minério proveniente do desviador de fluxo é transportado pelo transportador de correias para alimentar a empilhadeira, podendo ser empilhado no pátio de bauxita bruta (não lavada), ou no pátio de bauxita britada. A empilhadeira é responsável pela formação das pilhas de homogeneização.

A alimentação da planta de lavagem é realizada quando essa está em operação, com uma ou duas linhas em funcionamento. O material proveniente do divisor de fluxo é descarregado no transportador de correias que conduz o minério para as linhas em questão.

Retomada do Pátio de Bauxita Britada e Alimentação da Lavagem

O minério estocado no pátio de bauxita britada é retomado através das pás-carregadeiras, que alimentam os três alimentadores (moegas). Esses alimentadores descarregam em um transportador de correias, que direciona o material para outro transportador que alimenta a usina.

Carregamento de vagões

O carregamento de vagões ocorre nos pátios de estoque de bauxita bruta e bauxita lavada que foram empilhadas. Quando o trem chega ao pátio para ser carregado, os vagões são posicionados de forma a aprimorar o deslocamento das carregadeiras entre as pilhas e o trem. Isso permite uma otimização do tempo de carregamento do trem, e pode definir mais facilmente a quantidade de carregadeiras que participarão de cada carregamento. Cada carregadeira é responsável por encher um vagão de cada vez. Após carregado, o trem percorre uma hora de percurso, em torno de 54 km, até chegar ao porto de embarque da bauxita.

Pátios

Na área de mina existem, portanto, 4 pátios: pátio das pilhas pulmão, pátio de bruta, pátio de britado e pátio de lavado. O pátio das pilhas pulmão, total de quatro pilhas, é responsável para completar a taxa de alimentação do britador, quando a mina está operando com um número menor de frentes de lavra. O pátio de bauxita bruta é onde é feito o carregamento de trens deste tipo de produto. O pátio de britado, recebe o minério classificado como lavado, mas que ainda não passou pela usina. Esta área é usada para estocar este tipo de minério quando a usina está com uma ou duas das linhas paradas. Posteriormente este material vai alimentar as linhas da usina. Pode-se ter até quatro pilhas de bauxita bruta e quatro pilhas de britado. Por fim, o pátio de lavado recebe o produto bauxita lavada, ou seja, que passou pela usina e que será carregado nos trens para ser enviado posteriormente para o porto de embarque.

Desenvolvimento dos modelos

No modelo de britagem construído, ocorrem operações que envolvem fluxo contínuo de minério, ou seja, empilhamento, alimentação dos britadores, britagem, transporte através de correias do britador até a usina e empilhadeira e transporte dos alimentadores das moegas do pátio de retomada até a usina. Conforme Ouellet (2017), a construção de um modelo de fluxo contínuo de material em um processo pode ser por discretização por massa, discretização por tempo ou uso do *template Flow Process* do programa ARENA.

A discretização por massa é usada para demonstrar o transporte de uma certa massa em um tempo definido. Quanto menor a massa discretizada, menor será o tempo de transferência de massa e, o sistema estará mais próximo de um sistema contínuo. Quanto maior a massa, menos precisa é a simulação. O tempo de execução do modelo será maior quando as unidades discretas são menores, então é necessário que seja escolhida uma unidade de referência que tenha uma boa precisão e um bom desempenho do modelo. Uma vantagem da discretização por massa é que se pode associar atributos ao elemento discreto de massa, por exemplo, teores. É claro que se o processo a ser simulado for totalmente contínuo, a discretização por massa vai corresponder

também a uma discretização por tempo. Foi utilizada a discretização por massa adotando-se o valor de uma tonelada para a massa discreta.

O ideal é simular o fluxo contínuo separadamente por cada trecho em que o mesmo ocorre, onde exista um equipamento por onde o fluxo passa, ou seja, através dos britadores, desviadores de fluxo, empilhadeira e trechos de correias. Desta forma, pode-se controlar separadamente a situação de cada equipamento (se está em manutenção, operando ou ocioso), de forma que se um equipamento pertencente a uma sequência de trechos em que o fluxo contínuo deixe de funcionar, automaticamente o programa “reconhece” essa situação e para todos os equipamentos que se encontram em uma posição anterior ao equipamento em que ocorreu a falha.

Devido a restrições da versão do Arena utilizada na construção dos modelos, não foi possível se trabalhar dessa forma. Algumas simplificações foram realizadas, como por exemplo, foi considerado que no tempo de reparo, MTTR, do britador, estivesse incluído o tempo de reparo de todas as correias transportadoras até o desviador de fluxo e do desviador de fluxo até à empilhadeira. Devido a essas restrições no modelo de britagem, foram consideradas as manutenções somente das linhas da usina, empilhadeira e britador.

Modelo da Britagem para Bauxita Lavada

Na construção do modelo de britagem de bauxita lavada, várias situações que influenciam o fluxo de minério tiveram de ser levadas em consideração, como parada de uma linha da usina, parada geral da planta, redução do número de frentes na mina e parada da britagem, que podem acontecer inclusive concomitantemente, como o caso de parada do britador e de uma ou duas linhas da usina. Para cada situação, uma ou mais possibilidades de fluxo diferentes podem acontecer. Estas decisões podem envolver quantidade de minério que estão presentes nas pilhas, se a britagem está ou não aderente às metas que são definidas pela usina em função do atendimento de clientes, tempo de retorno de operação da mina, disponibilidade da empilhadeira, das linhas da usina e britador. Para construção dos modelos da britagem, foram implementados os fluxos de decisão adotados na empresa e que são descritos em seguida.

Parada de uma linha da planta

Quando ocorre a parada de uma linha da usina, é verificado se o pátio ainda tem capacidade de receber material via empilhamento. Caso a capacidade do pátio esteja menor que 150.000 toneladas, ocorre a alimentação da planta via uma linha da usina e empilhamento de bauxita. Caso o pátio esteja em sua capacidade máxima, apenas uma linha da usina é alimentada e a taxa de alimentação do britador é diminuída.

Parada geral da planta

Quando ocorre a parada das duas linhas da usina, é conferido se a britagem está aderente à meta. Esse valor pode variar dependendo do mês ou da produção. Caso não esteja aderente, ocorre o empilhamento no pátio de bauxita britada. Se está aderente, avalia-se a previsão de retorno e se o pátio puder receber mais material, é feito o empilhamento. Se não houver previsão e não houver espaço, aguarda-se até que se possa empilhar.

Redução na capacidade de alimentação pela mina

Quando ocorre a redução do número de frentes por parte da mina, se a britagem estiver aderente ao plano de produção, ocorre a retomada do pátio de bauxita britada para completar a taxa que alimenta a usina. Se não estiver aderente, completa-se a taxa com material das pilhas pulmão.

Parada na britagem

Quando ocorre parada na britagem, verifica-se se a usina está em operação. Se não estiver, aguarda-se o retorno da britagem. Se a usina estiver em operação e se houver material no pátio de britado para retomada, inicia-se imediatamente a retomada de material do pátio de britado para a usina. Em caso contrário, espera-se o retorno da britagem.

No caso da bauxita lavada, para se atender a capacidade de produção das duas linhas da usina, que é em torno de 550 a 570 toneladas por hora, é preciso uma taxa de alimentação do britador de 1200 t/h. Para se atingir esta meta é necessário que três frentes de minério estejam em operação, pois cada uma contribui em média com 400 t/h. Quando ocorre uma redução do número de frentes, a taxa deve ser completada com material proveniente das pilhas pulmão.

Coleta dos Dados

Além do levantamento dos parâmetros das operações e equipamentos, foram coletados dados das variáveis envolvidas nos processos. Após a eliminação de erros, os dados foram analisados estatisticamente e suas distribuições de probabilidades ajustadas usando a ferramenta *Input Analyser* do ARENA para serem usadas nos modelos.

Modelos de simulação da britagem e carregamento de vagões

Foram construídos, de forma análoga, dois modelos de simulação das operações relacionados à área de britagem: um para o circuito do minério classificado como lavado e outro para a bauxita bruta. Também de forma análoga, dois outros modelos foram construídos para o carregamento de produtos: um para o carregamento de trens para a bauxita bruta e outro para o carregamento da bauxita lavada. Maiores detalhes sobre os modelos podem ser encontrados em MACHADO (2019). Imagens contendo os módulos de programação utilizados nos modelos construídos para a britagem e carregamento de vagões são apresentados em MACHADO (2019).

Devido às restrições da versão do software utilizado, não foi possível construir modelos que contemplassem conjuntamente as operações de britagem e carregamento de vagões.

Esta subdivisão tem a vantagem de se ter modelos relativamente mais simples, que não afetariam em nada os resultados quando se deseja avaliar somente o comportamento de determinado tipo de operações, como por exemplo, o carregamento de minério de bauxita bruta.

Em contrapartida, essa separação não permitiria, por exemplo, que se pudesse utilizar um único modelo para definir qual seria a melhor alocação das carregadeiras para que as diferentes operações, das quais as mesmas participam, pudessem ser realizadas com um melhor desempenho. Existem sete pás carregadeiras que podem ser usadas nas operações de carregamento de vagões com minério de bauxita bruta ou lavada, na retomada das pilhas pulmão para alimentação da moega do britador e na retomada das pilhas de britado para alimentar as

linhas da usina. Normalmente a alocação é definida, e espera-se que assim se consiga atingir os objetivos pretendidos numa determinada situação. Através de um modelo integrado, diferentes possibilidades de alocação poderiam ser testadas, verificando-se o impacto sob cada operação para se definir qual seria a distribuição das pás carregadeiras mais adequada para melhor atender os objetivos desejados.

Com uma versão “sem limitações” poderiam ser construídos modelos de britagem com mais recursos de animações, vários dados de entrada poderiam ser inicializados ou lidos de uma planilha do Excel ao invés de se definir valores iniciais no módulo de dados *variable*, a manutenção de todos os equipamentos poderia ser levada em conta, além de outras operações que reproduziriam mais fielmente a realidade, sem a necessidade de se fazer simplificações. Uma dessas simplificações ocorreu na retomada do pátio de britado, em que se considerou a existência de uma única pilha de britado e com uma única moega de alimentação das linhas da usina, quando na realidade existem três.

4 RESULTADOS

Com os modelos construídos e sem erros de programação, passou-se à fase de validação. A validação dos modelos pode ser feita de duas maneiras. Caso o modelo possa ser utilizado para se buscar reproduzir um cenário que ocorreu no sistema em uma época, da qual se tem registros de dados que possam ser alimentados no modelo, informações de como o sistema estava operando e registros de resultados de variáveis de controle como por exemplo, produção acumulada ou produtividade do sistema, o modelo pode ser carregado com essas informações, ser colocado para rodar e os resultados poderiam ser comparados com aqueles já registrados.

Em certos casos isso não é possível devido a impossibilidade de se acessar tais informações, que muitas vezes são inexistentes, ou mesmo devido ao fato de que o modelo possa ter sido construído para representar um cenário alternativo de operação do sistema, que provavelmente, nunca tenha ocorrido antes.

À vista disso deve-se alimentar o modelo com dados de entrada ou informações e observar se os resultados que ele está produzindo estão de acordo com os resultados previsíveis que ele deveria apresentar para as informações de entrada que foram utilizadas. Por exemplo, é de se esperar que, ao não considerarmos manutenção de equipamentos que exerçam influência na produtividade de uma dada operação, haja um acréscimo na produtividade.

4.1. Validação do Modelo do carregamento de vagões de bauxita bruta.

A fim de validar este modelo, foram empregadas informações referentes ao processo de carregamento de vagões de trens de bauxita bruta registrados durante um mês. O modelo foi alimentado com as distribuições de probabilidade obtidas com os dados de chegada de trens, número de vagões, massa carregada dos vagões e massa carregada nas conchas das carregadeiras utilizadas no carregamento medidos no período avaliado. Foram consideradas 5 carregadeiras para se efetuar o carregamento. Assim, foram realizadas 30 réplicas de período igual a 30 dias. Escolheu-se o número de trens que foram carregados e a massa carregada durante o período. A Tabela 1 mostra para estas variáveis, o valor mínimo, máximo, médio e intervalo de confiança de 95% obtidos para as 30 simulações efetuadas.

Tabela 1: Valores obtidos através dos resultados do modelo de carregamento de bauxita bruta.

Variável	Média	IC (95%)	Mínimo	Máximo
Massa carregada nos trens	49.929,73	(49.924,93 +/- 7.411,30)	21.654	101.655
Número de trens	18,63	(18,63 +/- 2,86)	8	39

O número de trens carregados observados no período foi de 18 próximo do valor médio e a massa total carregada nos trens foi de 45.100 t. Na Tabela 2 é demonstrada a taxa de utilização dos recursos carregadeiras e o número de vezes que estes recursos foram ocupados.

Tabela 2: Valores de utilização e número de vezes em que os recursos foram ocupados previstos pelo modelo de carregamento de bauxita bruta.

Recursos	Taxa de utilização (%)	Número de vezes ocupado
carregadeira 1	0.10	118.80
carregadeira 2	0.11	134.50
carregadeira 3	0.10	120.63
carregadeira 4	0.10	121.40
carregadeira 5	0.09	107.13
pátio de carregamento	0.13	18.63

Observa-se que a taxa de utilização de todas as carregadeiras e o número de vezes em que foram usadas são praticamente iguais, pois o critério de seleção utilizado na alocação foi o rodízio (*cyclical*) e estão baixas. Baixa também é a taxa de utilização do recurso pátio de carregamento e o número de vezes em que foi ocupado corresponde ao número de trens carregados.

A taxa de utilização reduzida reflete o fato de que a demanda de bauxita bruta é pequena, portanto, o intervalo entre chegada de trens é elevado, ou seja, praticamente não há formação de fila no pátio de carregamento, o que pode ser constatado no relatório sobre filas do Arena, embora não tenha sido apresentado neste trabalho.

Diante do exposto, podemos concluir que este modelo está validado.

4.2. Validação do Modelo do carregamento de vagões de bauxita lavada.

O mesmo procedimento utilizado para validar o modelo de carregamento de vagões com bauxita bruta foi aplicado para a bauxita lavada. Foram executadas 30 réplicas de duração igual a 30 dias (um mês) e dentre vários resultados que o Arena fornece, escolheu-se principalmente o número de trens e a massa carregada durante o período para se tentar validar o modelo. A Tabela 3, mostra para estas variáveis, o valor mínimo, máximo, médio e intervalo de confiança de 95% obtidos para o número de trens carregados e massa carregada no período considerado de um mês para as 30 simulações efetuadas.

Tabela 3: Valores obtidos através dos resultados do modelo de carregamento de bauxita bruta.

Variável	Média	IC (95%)	Mínimo	Máximo
Massa carregada nos trens	521.371,17	(521.371 +/- 8617)	479.059	565.425

Número de trens	194,13	(194,13 +/- 3,3)	177	211
-----------------	--------	------------------	-----	-----

O número de trens carregados observados no período foi de 196 próximo do valor médio e a massa total carregada nos trens foi de 553.546 t. Na Tabela 4 é apresentada a taxa de utilização dos recursos carregadeiras e o número de vezes que estes recursos foram ocupados.

Tabela 4: Valores de utilização e número de vezes em que os recursos foram ocupados do modelo de carregamento de bauxita lavada.

Recursos	Taxa de utilização (%)	Número de vezes ocupado
carregadeira 1	22,64	1302,57
carregadeira 2	24,42	1403,70
carregadeira 3	22,83	1312,47
carregadeira 4	22,86	1315,07
carregadeira 5	20,11	1156,30
pátio de carregamento	27,84	194,47

Observa-se que a taxa de utilização de todas as carregadeiras e o número de vezes em que foram usadas são praticamente iguais, pois o critério de seleção utilizado na alocação foi o rodízio (*cyclical*) em torno de 20%. Esta taxa é baixa mas, bem mais alta do que no caso da bruta. A taxa de utilização do recurso pátio de carregamento é bem mais alta do que o da bruta também, em torno de 25%. Este valor indica que na maior parte do tempo de um mês o pátio está ocioso por falta de trem para carregar.

A demanda de bauxita lavada é bem mais elevada, entretanto não chega haver também formação de fila, pois estas são muito pequenas. O maior tempo médio de espera é para um vagão esperando para alocar uma carregadeira, que é aproximadamente de 0,8 minutos. Da mesma forma, praticamente não há formação de fila no pátio de carregamento. O maior valor deste tempo nas 30 simulações foi de 0,2 minutos.

Tal como no caso da bauxita bruta, considerou-se validado o modelo para a bauxita lavada.

4.3. Validação do Modelo da britagem de bauxita Bruta

Nessa situação, não se tem dados medidos para todos os parâmetros de entrada do modelo de britagem para bauxita bruta. O processo de validação neste caso, se deu através da análise do comportamento de cenários diferentes que se obtém através da modificação de dados ou informações realizada sobre um ou mais modelos.

Os diferentes cenários foram rodados uma única vez e durante um período de simulação de 48h.

As comparações foram realizadas sobre as variáveis massa empilhada no pátio de bruta que deve ser igual à massa que passa pelo britador, a massa que alimenta a usina proveniente da retomada do pátio de britado e a massa que entra e sai da pilha pulmão e ou de suas respectivas taxas em toneladas por hora.

Considerou-se inicialmente para o cenário 1 que a massa presente na pilha pulmão era de 100000 t, a massa no pátio de bruta igual a 200000 t, a massa no pátio de britado igual a 100000 t, uma meta de britagem de 100000 t, a produtividade do alimentador de sapatas da moega que alimenta o britador de 1600 t/h, a produtividade de cada linha da usina de 570 t/h, número de



frentes de lavra igual a 3, o número de carregadeiras disponibilizadas para a retomada do pátio de britado de 3 e para a retomada da pilha pulmão de 1. Foi considerado também a manutenção de todos os equipamentos.

A Figura 2, apresenta os quadros com os valores das variáveis a serem analisadas antes e após a simulação do cenário 1.

Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina	Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina
0.0	0.0	0.0	73397.0	21313.5	50917.0
Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada	Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada
100000.0	0.0	0.0	83570.5	4884.0	73398.0
Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW	Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW
20000.0	100000.0	0.0	93397.0	48064.7	48.0

Figura 2: Quadro de valores da simulação no cenário 1.

Nota-se que houve retomada da pilha pulmão, 21313.5 t, ou seja, a pilha pulmão contribui com uma massa correspondente a uma taxa de alimentação do britador de 444 t/h. A massa que passa pelo britador e que é idêntica à massa empilhada, corresponde a uma taxa de 1529 t/h, logo, as três frentes de lavra são responsáveis pela alimentação de uma massa no britador de 73397 t. A massa de minério proveniente da mina foi direcionada para a pilha pulmão, provavelmente devido a paradas do britador e da empilhadeira. Se for calculada a massa de minério proveniente das frentes de lavra que entrou na pilha pulmão e que entrou no britador teremos uma taxa horária de aproximadamente 1187 t/h, próximo de 1200 t/h, ou de 400 t/h que é normalmente a contribuição de cada frente, no caso de bauxita bruta.

Dessa forma, utilizando as 3 carregadeiras fazendo a retomada da pilha de britado, a massa que alimentou a usina corresponde a uma taxa aproximada de 1060 t/h estando inicialmente as duas linhas da usina em operação, cada uma com capacidade de 570 t/h.

Já no cenário 2, foi considerado que se tem somente 2 carregadeiras disponíveis para a retomada da pilha de britado e nenhuma para a pilha pulmão.

Para o cenário 3 foram mantidos os mesmos parâmetros do cenário 2 com exceção dos tempos de reparo do britador que antes era de 1,48 h e que passou a ser de 3,48h, e do tempo de reparo da linha 1 da usina que passou de 1,70 h para 3,70h.

A Figura 3 apresenta os quadros com os resultados do cenário 2 (direita) e do cenário 3 (esquerda).

Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina	Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina
55363.0	0.0	38914.0	52958.0	0.0	38108.0
Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada	Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada
102516.0	2516.0	55364.0	104921.0	4921.0	52959.0
Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW	Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW
75363.0	61057.5	48.0	72958.0	61867.0	48.0

Figura 3: Quadro do resultado da simulação do cenário 2 e cenário 3.

No cenário 2 nenhuma massa foi retomada da pilha pulmão. A massa que passou pelo britador e que foi empilhada neste caso é menor, pois é proveniente somente das frentes de lavra, que contribuem conjuntamente com uma taxa de 1153 t/h, ou cada uma com aproximadamente 384 t/h. Como houve uma entrada de massa na pilha pulmão, a produção total das 3 frentes foi de 57880 t, o que corresponde a uma taxa de 1200 t/h ou de 400t/h por frente.

Como houve diminuição do número de carregadeiras para fazer a retomada do pátio de britado, a massa que foi para a usina diminuiu, bem como a taxa horária, cujo valor reduziu a 810 t/h.

Com o aumento do tempo de reparo do britador, a massa empilhada diminuiu e fez aumentar a massa que é descarregada na pilha pulmão. Com o aumento do tempo de reparo da linha 1 da usina, a massa alimentada da usina diminuiu também em relação ao cenário 2.

Em todos os três cenários foram obtidos resultados coerentes, o que se leva a concluir que o modelo possa ser validado, na falta de mais informações sobre o comportamento do sistema.

4.4. Modelo da britagem de Bauxita Lavada

Tal como no caso do modelo da britagem de bauxita bruta e pelos mesmos motivos, não será possível realizar a validação através da comparação entre o comportamento fornecido pelo modelo de simulação e o comportamento registrado em um instante do tempo real anterior ao instante em que se realizou a simulação.

Foram rodados e comparados, então, diferentes cenários com uma duração de 48 horas.

Para o cenário 1, será considerado inicialmente que a massa presente na pilha pulmão seja de 100000 t, a massa no pátio de britado igual a 145000 t, uma meta de britagem de 600000 t, a produtividade do alimentador de sapata da moega de 800 t/h, a produtividade de cada linha da usina de 570 t/h, número de frentes de lavra igual a 2, o número de carregadeiras disponibilizadas para a retomada do pátio de britado de 1 e que não haverá retomada da pilha pulmão. Considerou-se ainda que quando o minério ao mesmo tempo for alimentar a usina e ser empilhado (quando uma das linhas estiver em manutenção), a parcela a ser empilhada corresponda a 50% do fluxo de minério que passa pelo britador. Foi considerado também a manutenção de todos os equipamentos.

A Figura 4 apresenta os quadros com os valores das variáveis a serem analisadas antes e após a simulação do cenário 1.

Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina	Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina
0.0	0.0	0.0	1433.0	0.0	54798.5
Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada	Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada
0.0	0.0	0.0	37779.5	19019.0	37212.5
Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW	Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW
100000.0	145000.0	0.0	100000.0	127403.2	0.0

Figura 4: Quadro de valores da simulação no cenário 1.

Nota-se que houve produção da usina através de alimentação proveniente do britador e da pilha de britado. A britagem contribuiu com uma taxa horária média de 745 t/h e o pátio de britado com 396 t/h, dando um total de 1141 t/h. Uma parte que passou pelo britador foi para o

empilhamento. Contabilizando esta parcela, tem-se que a taxa de britagem média foi de 775 t/h, próxima de 800 t/h que é compatível com um número de frentes igual a 2.

A Figura 5, apresenta a situação do cenário 1 até o instante de 28.4 horas (TNOW), quando a linha 1 entra em manutenção.

Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina
0.0	0.0	33958.0
Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada
22689.0	11269.0	22689.0
Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW
100000.0	133720.0	28.4

Figura 5: Quadro de valores do cenário 1 no instante 28.4 horas.

Neste momento, não havia empilhamento, o que passou a ocorrer, pois somente uma linha da usina não consegue absorver mais do que 570 t/h. Este resultado está de acordo com os fluxos de decisão relativos à redução da produção devido a um número de frentes menor do que 3 e quando se tem somente uma linha produzindo.

No cenário 2 foi considerado que foi disponibilizada uma carregadeira para se fazer a retomada da pilha pulmão e que a produtividade do alimentador de sapata tenha sido ajustada para 1200 t/h, ao invés de 800 t/h.

O que muda no cenário 3 em relação ao cenário 2, é que nele será considerada que no início da simulação já se tem uma massa britada acumulada de 560000t, próxima da meta de 600000t.

A Figura 6 apresenta os quadros com os resultados do cenário 2 (direita) e do cenário 3 (esquerda).

Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina	Massa empilhada	Alimentação pulmão	Produção usina
2149.5	25449.9	54258.0	1127.5	17860.6	44644.5
Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada	Produção da usina via britador	Produção da usina via pátio	Massa britada
53671.0	587.0	55820.5	38873.5	5771.0	40001.0
Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW	Massa final pilha pulmão	Massa final pátio de britado	TNOW
74550.1	146563.2	48.0	82139.4	140344.8	48.0

Figura 6: Quadro de resultados da simulação do cenário 2 e cenário 3.

No cenário 2 a massa britada de 55820,5 t agora foi maior devido a contribuição de 25450 t proveniente da pilha pulmão com uma taxa de 530 t/h. As frentes de lavra contribuíram com uma massa de 30370.6 t correspondente a uma taxa de 632 t/h, totalizando uma taxa de britagem média de aproximadamente 1162 t/h. Retirando a parte que foi empilhada, a taxa média de alimentação da usina via britador foi de 1118 t/h.

A taxa total de alimentação da usina foi de 1130 t/h, já que houve uma pequena contribuição da retomada do pátio de britado. Como a taxa de britagem deste cenário foi maior devido à contribuição da pilha pulmão, não houve necessidade de se procurar completar a taxa de alimentação da usina com mais minério proveniente do pátio de britado como no cenário 1. O que foi para a usina via pátio provavelmente foi quando uma das linhas estava em manutenção.

No cenário 3 a massa britada foi de 40000 t, o que faltava para atingir a meta de 600000 t. A alimentação da usina via britador foi menor que a do cenário 2, correspondendo a aproximadamente 810 t/h. A taxa de alimentação média da usina foi de 930 t/h, tendo recebida uma pequena contribuição do pátio de britado.

A comparação entre esses cenários, indica a princípio, que ele poderia ser validado devido aos resultados coerentes encontrados.

5 CONCLUSÃO

Através do conhecimento de forma bem detalhada das operações envolvidas no processo de britagem dos minérios de bauxita bruta e lavada, desde a alimentação da moega do britador através de minério proveniente das frentes de lavra e pilha pulmão, empilhamento no pátio de britado e bruta até à alimentação da usina, bem como as operações de carregamento de vagões no pátio de bruta e de lavado, foi possível a construção de modelos de simulação a eventos discretos representativos dessas operações.

Dados importantes para se construir e alimentar os modelos foram obtidos a partir de registros anteriores ou através de medição direta no campo. O levantamento e a compreensão de todas as limitações e opções de fluxo dentro do processo foi outro ponto muito importante. Os dados numéricos obtidos das variáveis aleatórias que influenciam as operações foram tratados estatisticamente e através da ferramenta *input analyser* foram ajustadas funções de distribuição de probabilidade que representavam o comportamento estatístico delas.

Foram construídos quatro modelos de simulação, um que representa as operações envolvidas na área de britagem quando o tipo de minério é de bauxita bruta, outro pra o minério do tipo de bauxita lavada, um modelo de carregamento de vagões para a bauxita bruta e outro modelo para o carregamento de bauxita lavada.

Os modelos de carregamento de vagões tanto para o caso de bauxita bruta quanto para o caso de lavada foram validados através da comparação dos resultados da simulação com valores conhecidos já registrados, que se mostraram estatisticamente próximos dos reais.

Devido à falta de alguns registros de informações, os modelos de britagem foram considerados válidos através do comportamento individual de cada cenário e de comparação dos resultados entre eles. Todos os cenários avaliados apresentaram resultados coerentes. Recomenda-se uma validação futura deste modelo com dados reais.

Uma vez que considerados válidos, os modelos podem ser usados para se avaliar cenários alternativos como ficou demonstrado neste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. Introdução a pesquisa operacional. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTCE 2004. ISBN 8521614128.

FREITAS FILHO, P. J. Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena. 2 ed. Florianópolis: Visual Books. 2008.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R.P; SADOWSKI, D. A. Simulation with arena. New York: McGraw-Hill, 1998.

KELTON, W. D.; SARDOWSKY, R. P.; SARDOWSKY, D. A. Simulation with ARENA. 5ª Edição. McGraw-Hill. 2010.

MACHADO, N. R. S. Modelagem do fluxo de minério do circuito de britagem em planta de beneficiamento e do carregamento de produtos de uma mina de bauxita no Pará através do software Arena. 2019. 109 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

OUELLET, Alex. Strategies to Model Ore Processing Plants. Disponível em: <<https://www.arenasimulation.com/blog/post/strategies-to-model-ore-processing-plants?/support/entry/strategies-to-model-ore-processing-plants-and-continuous-systems-in-arena>>. Acesso em 17 de julho de 2019.

PARAGON, B.M. Introdução à simulação com ARENA. São Paulo, 2006.

PRADO, D. Usando o ARENA em simulação. Belo Horizonte (MG): Desenvolvimento Gerencial. V.3. 1999.

SANTOS, J. A. A. e ALVES, R. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014. DOI: 10.15628/holos.2014.1099. HOLOS, Ano 30, Vol. 4.

WAVRZYNCZAK, H. C., ULBRICHT, G. & TEIXEIRA, E. S. M. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2015. DOI: 10.15628/holos.2015.3605. HOLOS, Ano 31, Vol.8.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Machado, N. R. de S., Cabral, I. E., Alves, V. K., & Assis, B. D. de. MODELAGEM DO FLUXO DE MINÉRIO DA BRITAGEM E CARREGAMENTO DE PRODUTOS DE UMA MINA NO SOFTWARE ARENA®. HOLOS, 7(39). <https://doi.org/10.15628/holos.2023.11433>

SOBRE OS AUTORES

N. R. S. MACHADO

MSc. em Engenharia Mineral e Engenheira de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto e técnica em geologia e mineração, atuou na área de operação de mina a céu aberto, processo de britagem e carregamento e transporte de produtos, sendo possível desenvolver modelos de simulação de processos em software. Adquiri conhecimentos de língua inglesa na mobilidade acadêmica realizada na Montanuniversitaet Leoben na Áustria, como também noções básicas de alemão. Durante a graduação desenvolvi projetos na área de processamento mineral e ensino aplicado à engenharia de minas.

E-mail: nayaramachado13@yahoo.com.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0129-8681>

I. E. CABRAL



Possui graduação em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto (1981), mestrado em Curso de Mestrado Em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal de Ouro Preto (1989) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (2002). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Ouro Preto. Tem experiência na área de Engenharia de Minas, com ênfase em Geoestatística, planejamento mineiro e pesquisa operacional atuando principalmente nos seguintes temas: geoestatística, métodos de estimativas de reservas, simulação geoestatística, pesquisa operacional, simulação a eventos discretos, otimização.

E-mail: ivo.cabral@ufop.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0321-0719>

V. K. ALVES

Possui graduação em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (1995), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (2006) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais (2013).

E-mail: vladmir.alves@ufop.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7320-3384>

B. D. ASSIS

Possui experiência em setores de processamento e pesquisa na indústria de mineração, com interesse em conduzir atividades de processamento mineral, projetos e pesquisas. Engenheira de minas pela Universidade Federal de Ouro Preto, possui mestrado realizado na Europa, nas instituições de ensino Université de Liege, Université de Lorraine e Lulea University of Technology. Atualmente trabalha no CRM Group, na Bélgica.

E-mail: barbaradornelasdeassis@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6240-6709>

Editor: Franciulli Araújo



Submetido 21/10/2020

Aceito 01/12/2023

Publicado 27/12/2023