



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS – EM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



NAYARA RILLA DE SOUZA MACHADO

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.

Ouro Preto - MG

Julho/2019

NAYARA RILLA DE SOUZA MACHADO

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.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

Ouro Preto - MG

Julho/2019

M149m Machado, Nayara Rilla de Souza.
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 [manuscrito] / Nayara Rilla de Souza Machado. - 2019.

105f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Beneficiamento de minério. 2. Métodos de simulação. 3. Bauxita. I. Cabral, Ivo Eyer. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.6

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No primeiro dia do mês de agosto de 2019, às 09h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“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”**, pela aluna **Nayara Rilla de Souza Machado**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral (orientador)**, **Prof. Dr. Elton Destro e Eng.º de Minas Rafael Antônio de Moraes Ferreira**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovação da candidata, com a nota 9,0, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 01 de agosto de 2019.

Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

Prof. Dr. Elton Destro
Membro da Comissão Avaliadora

Eng. de Minas Rafael Antônio de Moraes Ferreira
Membro da Comissão Avaliadora

Nayara Rilla de Souza Machado

Prof. Msc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

A Deus,
aos meus pais Guaracy e Délcio,
aos meus amados avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, e por ter direcionado meus caminhos para atingir meus objetivos e sonhos.

Agradeço à minha mãe Guaracy, *in memoriam*, por todo carinho, ensinamentos e apoio. Ao meu pai Délcio pelo incentivo e companheirismo de sempre. Aos meus avós por sempre torcerem por mim e acreditarem no meu potencial. À minha família, em geral, pela torcida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral por me acompanhar nessa etapa, pela paciência, compreensão e grande apoio que fizeram a diferença para que esse trabalho fosse possível. Aos demais professores do Demin, em especial ao José Fernando e Carlos Pereira, que me proporcionaram desenvolver outros trabalhos e me acompanharam em todas as etapas.

Agradeço aos amigos presentes em Ouro Preto, em especial Matilde, pela amizade e companheirismo. À Anastassia, Letícia, Bárbara, Carlos, Evelyn e Marcos por estarem sempre ao meu lado, apoiando e incentivando. À República Akibezeza pelos anos de batalha, obrigada belezocas! À República Balaio pelo convívio e aprendizado. Vocês são incríveis! Aos amigos de Santa Bárbara pelo carinho nos momentos difíceis.

À Gerência de Produção da Alcoa World Alumina de Juruti/PA, em especial ao Rhaymá, João, Romeu, Gabriela, Cissa e Ana Valente, por todas as experiências, crescimento profissional e ensinamentos durante o estágio.

À Montanuniversitaet Leoben/AUT e toda a equipe de funcionários ligados ao programa de mobilidade internacional, foi uma oportunidade de crescimento acadêmico como também pessoal.

Ao Departamento de Engenharia de Minas e à gloriosa Escola de Minas de Ouro Preto/UFOP, pelo ensino e experiências passadas nesses anos. À Fundação Gorceix por ter proporcionado a participação em congressos, eventos acadêmicos e cursos complementares.

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças.”

Charles Darwin

vii

RESUMO

O método mais utilizado para lavra de bauxita das minas no Pará é lavra por tiras (*Stripping Mining*). As etapas desse processo são: supressão vegetal, decapeamento de estéril, desmonte mecânico da bauxita, carregamento e transporte. Após esse processo, a bauxita é direcionada à britagem para reduzir o tamanho do material, sendo processada na usina de beneficiamento e, finalmente despachada para carregamento de vagões. A britagem é um processo integrante e indispensável da produção mineral, pois permite agregar valor ao produto, uma vez que reduz o minério para posterior lavagem na usina. Já 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 empresa de extração de bauxita no estado do Pará. Os modelos de carregamento apresentaram resultados próximos dos reais e portanto, foram validados. Os modelos de britagem foram considerados válidos por fornecerem resultados coerentes após serem testados em diferentes cenários.

Palavras-chave: bauxita, modelos de simulação, britagem, carregamento de vagões, Arena[®].

ABSTRACT

The most commonly used method for mines bauxite mining in Pará is Stripping Mining. The stages of this process are: vegetation removal, sterile removal, disassemble the bauxite, mechanical loading and transport. After this process, bauxite is directed to crushing to reduce the size of the material, being processed in the beneficiation plant and finally dispatched for loading wagons. Crushing is an integral and indispensable process of mineral production, as it allows adding value to the product, as it reduces ore for subsequent washing in the plant. Bauxite is transported from the storage yards by trains to the shipping port, which requires time and loading efficiency adjustments. Thus, in this study, simulation models of the crushing and loading of wagons processes were developed in the Arena® software to validate the production system of a bauxite extraction company in the state of Pará. 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, simulation models, crushing, loading wagons, Arena®.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geologia geral do depósito	16
Figura 2: Lavra por tiras	17
Figura 3: Sistema de nucleação em minas a céu aberto.	19
Figura 4: Decapeamento de estéril realizado por tratores	19
Figura 5: Lavra do minério.....	20
Figura 6: Mapa de localização de Juruti.....	22
Figura 7: Fluxograma área da britagem.....	24
Figura 8: Fluxograma do Carregamento de Vagões (Arquivo pessoal).....	26
Figura 9: Uso do modelo de simulação.....	35
Figura 10: DCA referente ao processo da Britagem.....	37
Figura 11: DCA referente ao carregamento de vagões.....	38
Figura 12: Calibração do modelo.....	41
Figura 13: Parada de um linha na planta.....	43
Figura 14: Parada geral da planta.....	44
Figura 15: Redução na alimentação por parte da mina.....	44
Figura 16: Parada na britagem.....	45
Figura 17: Modelo da britagem de bauxita lavada.....	46
Figura 18: Modelo da britagem do carregamento de bruta (não lavada).....	61
Figura 19: Modelo do carregamento de vagões bauxita lavada.....	72
Figura 20: Distribuição Empírica para intervalos de chegadas de trens.....	75
Figura 21: Curva de repartição representando a quantidade de vagões presentes nos trens.....	75
Figura 22: Distribuição de massa por conchada.....	76
Figura 23: Distribuição de massa dos vagões.....	76
Figura 24: Distribuição de tempo de ciclo das pás carregadeiras.....	77
Figura 25: Modelo do carregamento de bauxita bruta.....	84
Figura 26: Distribuição Empírica para intervalos de chegadas de trens.....	86
Figura 27: Curva de repartição representando a quantidade de vagões presentes nos trens.....	87
Figura 28: Distribuição de massa por conchada.....	87
Figura 29: Curva de repartição representando o tempo de ciclo das pá-carregadeiras.....	88
Figura 30: Quadro de valores no início da simulação no cenário 1.....	95
Figura 31: Quadro de resultados após a simulação do cenário 1.....	95
Figura 32: Quadro do resultado da simulação do cenário 2.....	96
Figura 33: Quadro do resultado da simulação do cenário 3.....	97
Figura 34: Quadro de valores no início da simulação no cenário 1.....	98
Figura 35: Quadro de valores após a simulação do cenário 1.....	98
Figura 36: Quadro de valores após a simulação do cenário 1.1.....	99
Figura 37: Quadro de resultados após a simulação do cenário 2.....	99
Figura 38: Quadro de resultados após a simulação do cenário 3.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compensação Financeira Pela Exploração Mineral (2017).	23
Tabela 2: Dados utilizados na construção do modelo de bauxita lavada.	73
Tabela 3: Dados de campo utilizados na construção das distribuições de probabilidade.	74
Tabela 4: Dados utilizados na construção do modelo de bauxita bruta.....	85
Tabela 5: Dados obtidos para alimentação do modelo de bauxita britada.	86
Tabela 6: Valores obtidos através dos resultados do modelo de carregamento de bauxita bruta.	90
Tabela 7: Valores de utilização e número de vezes em que os recursos foram ocupados do modelo de carregamento de bauxita bruta.	91
Tabela 8: Valores obtidos através dos resultados do modelo de carregamento de bauxita bruta.	92
Tabela 9: Valores de utilização e número de vezes em que os recursos foram ocupados do modelo de carregamento de bauxita lavada.....	93

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Configuração Geológica Geral	16
3.2 Método de Lavra por Tiras (<i>Srtipping Mining Method</i>).....	17
3.3 Supressão Vegetal	18
3.4 Decapeamento de Estéril	19
3.5 Lavra do Minério.....	20
3.6 A bauxita	21
3.7A Britagem na Mineração.....	23
3.7.1 Processo de Britagem.....	24
3.7.2 Estocagem e By-Pass no Pátio de Bauxita Britada	25
3.7.3 Retomada do Pátio de Bauxita Britada e Alimentação da Lavagem.....	25
3.7.4 Carregamento de vagões	25
3.7.5 Pátios	26
3.8 Pesquisa Operacional.....	27
3.9 Simulação de Sistemas Eventos Discretos	27
3.10 Elementos básicos de um modelo de simulação.....	28
3.11 O Programa Arena®	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
5. DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS	40
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
7. CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICES	106

1. INTRODUÇÃO

As substâncias metálicas têm grande importância para a indústria mineral brasileira, desde os tempos do Brasil Colônia: quando os bandeirantes adentraram o país a procura de metais preciosos. Foi uma forma de declarar novas rotas para a exploração do ouro no interior do Brasil, concomitantemente à ocupação dessa parte do território, mais especificamente em Minas Gerais (BRASIL, 2019).

Ao longo do tempo, o mercado mineral passou por vários momentos de crescimento em bens minerais comercializados, e conseqüentemente, os empreendimentos mineiros expandiram em capacidade produtiva. Assim, para analisar a capacidade de produção de um sistema mineral, são utilizadas várias formas de gestão do processo de produção (RODOVALHO, 2013).

Segundo Brasil (2019), com o avanço da tecnologia e o passar do tempo, houve maior ocupação do território, e foram descobertas outras substâncias que se destacaram no mercado nacional: o ferro e o manganês. Ainda de acordo com Brasil (2019), são 37 títulos ativos de pesquisa e lavra que possuem registro na Agência Nacional de Mineração. A quarta substância de maior produção bruta é o alumínio, proveniente do processamento da bauxita, destacando-se o estado do Pará como principal produtor de alumínio do país.

O alumínio é um metal não-ferroso que possui considerável desempenho para aplicações industriais, uma vez que técnicas intrínsecas de fabricação proporcionam a confecção de produtos acabados com preços competitivos no mercado. Por ser um material leve, resistente e macio, tornou-se um dos metais mais consumidos no mundo, sendo destaque as áreas de construção civil, principalmente na fabricação de grandes vigas (BRETAS, 2014).

O método mais comum de lavra de bauxita utilizado nas minas no Pará é o de lavra por tiras (*Stripping Mining*). As etapas de lavra da bauxita geralmente são: supressão vegetal, decapeamento, desmonte da bauxita, carregamento e transporte. Logo, a bauxita passa pelo processo de britagem, para redução de tamanho do material, e posteriormente, é processada na usina de beneficiamento e transportada pelo carregamento de vagões.

A britagem é o processo que permite agregar valor ao produto, uma vez que reduz o minério para posterior lavagem na usina. É um processo de suma importância, pois é parte integrante e indispensável da produção.

O transporte da bauxita a partir dos pátios de estocagem é realizado por trens até o porto de embarque, no qual a bauxita será transportada por navios até os clientes. Processo esse que demanda ajustes de tempo e de eficiência de carregamento.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta um estudo de modelagem dos processos de produção que ocorrem na britagem e no carregamento de vagões de uma mina de bauxita do estado do Pará, utilizando simulações no software Arena[®] para validação do sistema gerencial adotado pela empresa.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é construir modelos de simulação das atividades de britagem e de carregamento de vagões de uma mina de bauxita localizada no Pará, desenvolvidos no *software* Arena, para análise de possíveis cenários alternativos que possam contribuir para a melhoria das operações envolvidas.

2.2 Objetivos específicos

- Descrever o processo e as principais operações de produção de bauxita;
- Coletar dados em campo para serem utilizados na construção dos modelos propostos;
- Construção dos modelos de britagem e de carregamento de vagões para os produtos bauxita bruta e bauxita lavada;
- Validação dos modelos construídos através da comparação com valores reais de produção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Configuração Geológica Geral

Os horizontes da bauxita do Estado do Pará, são relativamente contínuos e bem definidos tornando o perfil geológico bem persistente. Os depósitos de bauxita formados através de processos de intemperismo sobre rochas sedimentares da formação Alter do Chão, de idade Cretáceo-Terciária, localizado na Amazônia oriental. São depósitos do tipo *'blanket'* e capeiam platôs dissecados cujos topos são testemunhos do Plioceno-Pleistocênio ou do final do Pediplano Plioceno, que corresponde às superfícies Velhas recente de King (1971) ou Pd – 1 de Bigarella & Andrade (1964) (ALCOA, 2009).

O principal horizonte de bauxita está confinado ao intervalo estratigráfico Cretáceo superior/Terciário Inferior da Formação Alter do Chão (ou Formação Barreiras). O depósito corresponde a um horizonte laterítico posicionado ao longo dessa sequência, que pode ser discretizado em três zonas distintas: argila Belterra, zona de laterita concrecionária e a zona saprolítica. A zona de laterita pode ser dividida em três partes: bauxita nodular, laterita e bauxita maciça. O perfil litológico do depósito em questão pode ser visto na Figura 1.

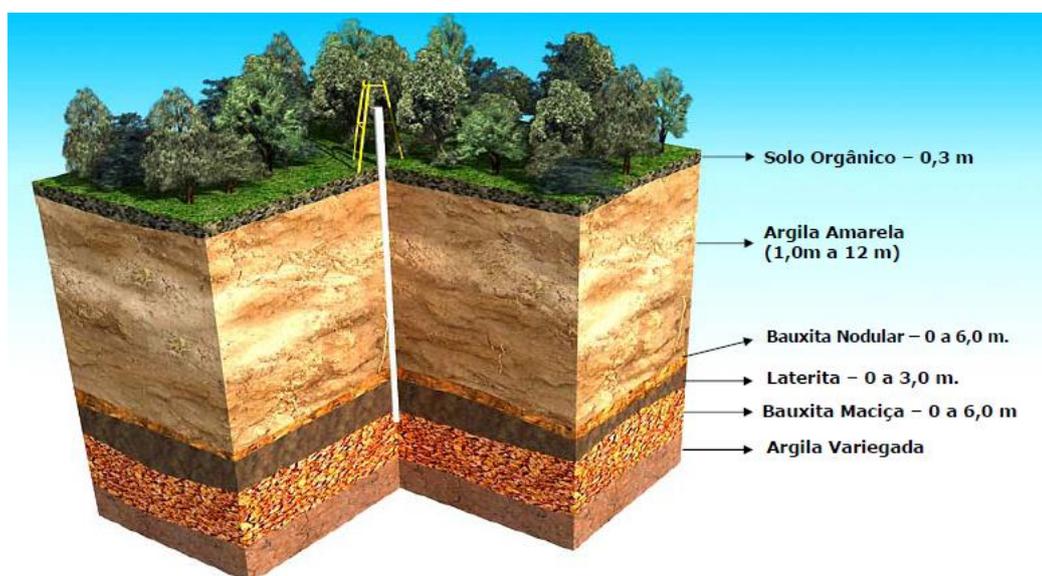


Figura 1: Geologia geral do depósito

(Fonte: Alcoa, 2009).

3.2 Método de Lavra por Tiras (*Srtipping Mining Method*)

Os métodos de lavra podem ser definidos em duas categorias relacionadas ao local de exploração: superfície e subterrâneo. O método de lavra de bauxita em questão é o de lavra por tiras, o qual ocorre na superfície, considerado lavra a céu aberto (HARTMAN, 1992).

Segundo Oliveira (2017), o método de lavra a céu aberto por tiras ocorre através da remoção do minério e estéril realizando cortes paralelos na forma de trincheiras que são denominadas tiras, como se pode ver na Figura 2. As operações que compreendem esse processo são a supressão vegetal, retirada do solo orgânico, decapeamento, escarificação do minério e extração da bauxita. O capeamento é depositado em áreas adjacentes já lavradas, não sendo encaminhado a bota-fora ou pilha de estéril.



Figura 2: Lavra por tiras

(Fonte: Abdala, 2011).

Segundo Harman e Mutmansky (2002, *apud* Abreu, 2017) o manejo do material está diretamente relacionado à escavação e transporte, que combinados em uma única operação e feitos por um único equipamento torna o método um dos de mais elevada produtividade e, em geral, com custo reduzido dentre os de grande utilização em lavra a céu aberto. Como esse método permite que o material estéril seja conformado em áreas previamente mineradas a operação de decapeamento fica concentrada em uma área restrita. Quando o estéril é depositado pode-se realizar a recomposição daquele terreno logo após a lavra, e uma vez que a tira fica aberta por pouco tempo os ângulos de taludes podem ser maiores.

3.3 Supressão Vegetal

Para que ocorra a lavra do minério, primeiramente, deve ser realizada uma etapa denominada supressão vegetal, que consiste na remoção da camada de solo orgânico e vegetação da superfície. Para que se inicie qualquer atividade para lavra do minério é importante avaliar diversos aspectos ambientais e procedimentos legais. No local onde será feita a supressão, é construída uma rota de fuga antes de iniciar os primeiros trabalhos. É construído um inventário sobre todas a fauna e flora encontradas na área. Os animais encontrados serão realocados em outra região que ainda não será explorada. As árvores e demais espécies vegetais serão catalogadas de acordo com classes pré-definidas, primeira ou segunda categoria. Na primeira, estão incluídas as árvores de grande porte, como as castanheiras que farão parte do posterior replantio. O bosqueamento é a etapa posterior, a qual consiste em abater as árvores de pequeno porte, que possuem diâmetro menor que 30 cm, e logo depois um trator irá eleirar todos os troncos e vegetais (CELSO, 2014).

Em seguida, haverá o corte de árvores de grande porte, com diâmetro maior que 30 cm, na qual são cortadas as raízes e as copas. As toras serão separadas dessa galhada, e os tratores irão limpar a área, removendo o *topsoil* e posicionando-o em leiras para que seja transportado. As toras vão para depósitos estipulados de acordo com a oportunidade na mina, e o restante da vegetação é utilizado no método de nucleação (Figura 3), que consiste na revegetação do local. Essa nucleação é formada pela junção de vegetais e *topsoil* formando montes em formato cônico espaçados uns dos outros. Esse espaçamento promove o acúmulo de água em meio aos núcleos, o que irá facilitar e impulsionar no crescimento da vegetação (ALCOA, 2005).

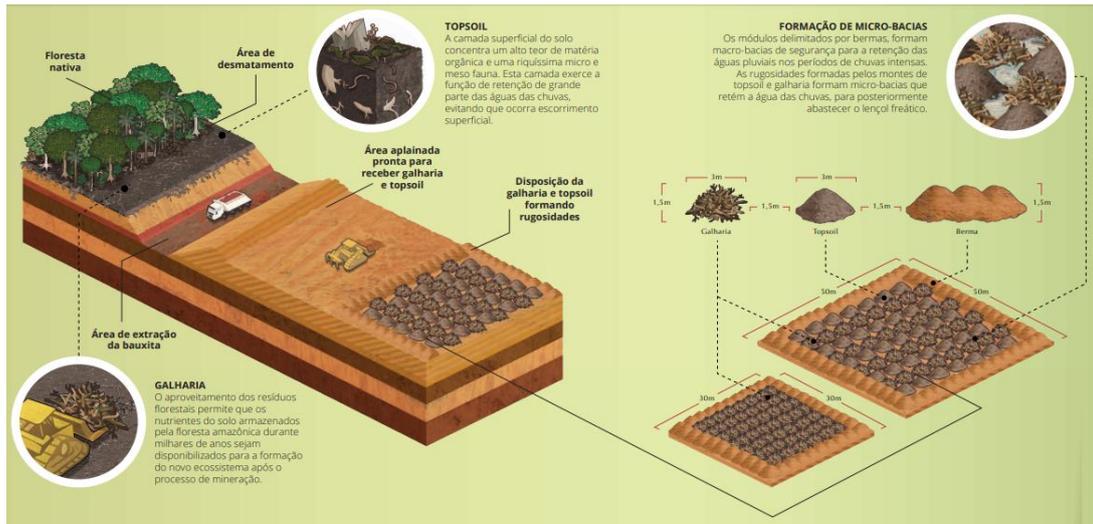


Figura 3: Sistema de nucleação em minas a céu aberto.

(Reis et al., 2014).

3.4 Decapeamento de Estéril

O decapeamento é uma etapa que ocorre logo após a supressão vegetal, e consiste na remoção de estéril realizada pelos equipamentos escavadeira e *bulldozers*. Conforme Figura 4, o estéril, composto de argila e laterita, é removido e depositado na tira lavrada anteriormente. Essa etapa irá promover a liberação da tira de minério que se deseja lavar posteriormente (BRETAS, 2014).

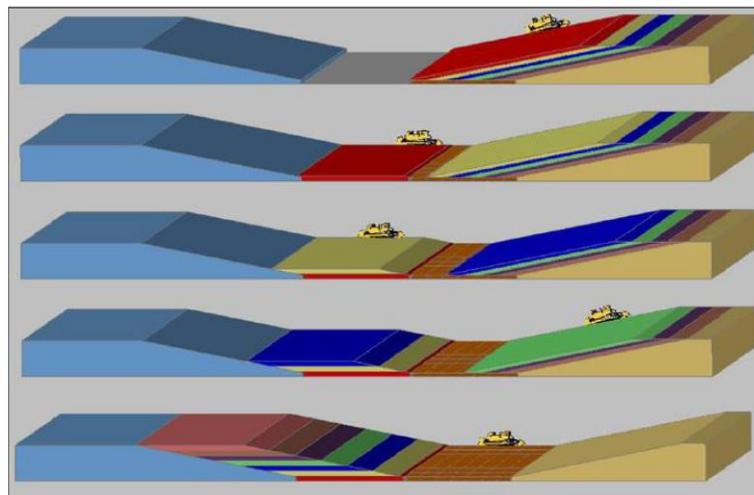


Figura 4: Decapeamento de estéril realizado por tratores

(Fonte: RODOVALHO E TOMI, 2014, *apud* Abreu, 2017).

A altura da camada de argila é variada, e esse fator requer destaque, uma vez que quando a altura é de 12m ou menos, o decapeamento será realizado apenas com a ação dos

bulldozers (tratores D11T) . Quando esse valor ultrapassa os 12 m, faz-se o recuo com a escavadeira do material situado acima desse valor. Essa atitude é tomada em prol dos tratores, para evitar que sejam sobrecarregados.

3.5 Lavra do Minério

A quantidade de material a ser lavrada em cada tira é medida pela equipe de topografia, através de escaneamento a laser, inicialmente do topo da camada de minério e posteriormente, após a reirada do minério, do fundo da tira, obtendo, assim o volume de minério extraído (ABREU, 2017).

O processo seguinte é a escarificação do minério, que é realizada pelo *shank* do trator D11. Esse *shank* dotado de uma aresta de corte do trator que executa uma malha quadrada nessa tira, formando blocos de aproximadamente 1,0 x 1,0 m. Esse valor é estipulado porque o tamanho máximo de blocos que o britador pode receber é 1,2 x 1,2 m, então deve-se atentar para essa premissa, a fim de que o caminhão transporte para o britador justamente o que é requerido pelo processo em sequência

O carregamento e transporte, Figura 5, efetuados pelos equipamentos escavadeira e caminhão, que são posicionados em paralelo, e a escavadeira na parte superior da tira próxima à área de retirada. Dessa forma, não há lançamento de fragmentos de material porque os equipamentos estão de forma linear. A seletividade é bem definida, pois o operador verifica o minério e evita retirar a argila variegada, que é um material com alto índice de caulim e sílica. A drenagem é direcionada das frentes de escavação para o fundo de cava (ALCOA, 2015).



Figura 5: Lavra do minério.

Após o enchimento da caçamba do caminhão, o mesmo é direcionado para descarga no britador ou para as pilhas pulmão existentes na praça próximo à moega que direciona o material para a britagem. Essas pilhas são formadas quando o britador encontra-se fora de funcionamento, e são retomadas com a pá-carregadeira, quando necessário. A distância média de transporte, DMT, que o caminhão percorre entre as tiras e o britador é sempre analisada e, quando há oportunidade, encontra-se novos caminhos para reduzi-la.

3.6 A bauxita

A bauxita é uma rocha conhecida por seu tom avermelhado, devido à quantidade de óxidos de ferro presentes na estrutura, a qual possui alta proporção em alumínio e cerca de 40% de alumina Al_2O_3 . É a rocha fonte do alumínio, sendo este o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre. A bauxita é produzida em diversos países do mundo como Austrália, Brasil, China, Grécia, Guiana, Guiné e Suriname. O Brasil está em terceiro posto com relação à classificação dos países no mundo, possuindo em termos de reserva cerca de 3,52 bilhões de toneladas (reservas medidas + indicadas + inferidas) (SAMPAIO *et al.*, 2005).

A descoberta da bauxita ocorreu em 1821 por Berthier, em Les Baux no sul da França. É uma rocha composta de 40% de alumina (Al_2O_3), rica em alumínio de cor avermelhada. A bauxita é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, sendo a fonte natural de alumínio (SAMPAIO *et al.*, 2005).

De acordo com Sampaio *et al.* (2005), a produção anual de bauxita é maior que 120 milhões de toneladas. Aproximadamente 95% da produção anual de bauxita é usada para produção de alumínio metálico, uma vez que ainda não há indícios do mesmo em forma metálica na natureza. Esse processo é feito através do processo Bayer em junção com O Hall-Héroult resultando em 40 milhões de t/ano de produção final.

Segundo Celso (2014), A bauxita pode ser aplicada na cadeia produtiva do alumínio (alumina e alumínio primário). Pode também ser aplicado para bauxita não metalúrgica, no qual se incluem: refratários, abrasivos, produtos químicos, cimentos de alta alumina e fabricação do aço. Os constituintes da bauxita “*in natura*” determinará as características do minério.

No Brasil, a produção de bauxita anual chegou a 49,7 milhões de toneladas em 2018, ressaltando que houve um decréscimo de 2,2 milhões de toneladas comparando com valores de 2017. Esse valor corresponde a uma variação negativa de 4,43% (BRASIL, 2018).

O Brasil exportou cerca de 37,9 milhões de toneladas de bauxita no ano de 2017, correspondendo a um total de R\$ 3,26 bilhões de reais. Já, o estado do Pará foi responsável pela comercialização de 36,8 milhões de toneladas de bauxita beneficiada em 2017, uma vez que isso corresponde a R\$ 3,22 bilhões de reais. Pode-se perceber então que 98,8% da venda de bauxita do país foi realizada por este estado (BRASIL, 2019).

A mina em questão se encontra no município de Juruti, localizado no oeste do Pará, Figura 6.



Figura 6: Mapa de localização de Juruti.

(Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Juruti>).

Segundo Brasil (2019), a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), Tabela 1, referente à produção de bauxita foi em torno de 83,1 milhões de reais, o que corresponde a uma participação percentual da substância no valor total da CFEM arrecadada de 5,54% no ano de 2017. Logo, o alumínio se encontra como terceira substância metálica que desencadeia o recebimento desse royalty, ficando atrás apenas do ferro (73,02%) e cobre (10,40%).

Tabela 1: Compensação Financeira Pela Exploração Mineral (2017).

Substância	CFEM arrecadada (R\$)	Participação (%) ⁽²⁾
Total	1.500.715.413	
Alumínio (bauxita)	83.143.263	5,54
Cobre	156.002.173	10,40
Cromo	5.752.960	0,38
Estanho	14.524.198	0,97
Ferro	1.095.771.648	73,02
Manganês	36.565.499	2,44
Nióbio	11.996.064	0,80
Níquel	19.608.115	1,31
Ouro	65.807.511	4,39
Vanádio	3.049.026	0,20
Zinco	8.494.957	0,57

(Fonte: Brasil, 2019).

3.7 A Britagem na Mineração

A britagem da bauxita é um processo de redução e classificação do tamanho do minério lavrado na mina. É quando inicia-se o processo de beneficiamento do minério, primeira etapa para agregar valor ao produto. Essa etapa é de suma importância, possuindo várias diretrizes para classificar o material.

A de área britagem foi escolhida para realização desse estudo, por ser uma área muito importante para o empreendimento, uma vez que todo o minério lavrado na mina tem de passar por essa etapa. O minério que é direcionado para essa área pode ser classificado em dois tipos dependendo da qualidade do mesmo. Existe o produto que é vendido como é lavrado chamado de bauxita não lavada ou bruta. O minério que será direcionado para a usina é denominado bauxita lavada (OLIVEIRA, 2017).

A principal vantagem desse processo consiste em redução do material para que possa ser transportado de uma forma mais fácil e não forçando os equipamentos da planta. O minério poderá ser direcionado para a planta de lavagem, como também para empilhamento nos pátios. Essa versatilidade confere ainda mais pontos positivos ao processo de beneficiamento mineral, adotado pela empresa.

Uma desvantagem notável é que, se existir algum problema em algum dos britadores e o processo ser interrompido, todos os outros equipamentos ficarão parados, impossibilitando o empilhamento de minério nos pátios.

3.7.1 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, e este por sua vez, encaminha o material até o britador primário, de rolos dentados, no qual o minério será britado (ALCOA, 2009).

O minério é transferido do britador primário para o britador secundário, também de rolos dentados, pela ação da gravidade. A descarga do primário é feita diretamente sobre o secundário, ou seja, não há nenhum equipamento intermediário entre os britadores. Depois de britado, o minério é encaminhado à primeira correia do processo 611A-TP-0001. Na Figura 7, pode-se visualizar o processo descrito:

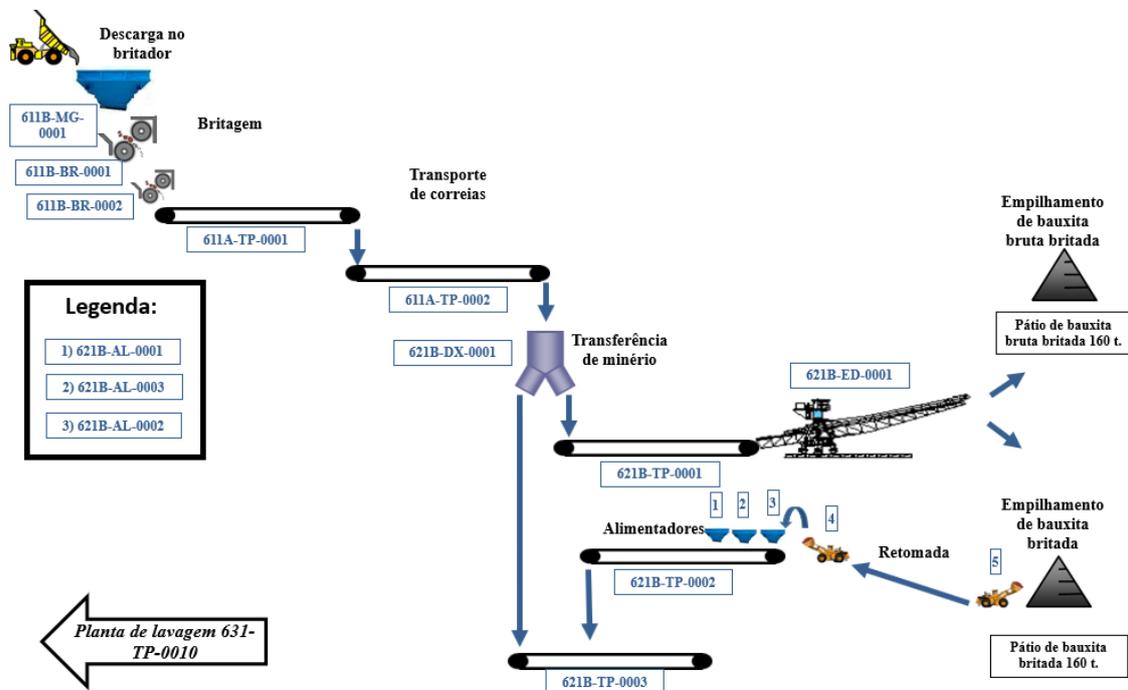


Figura 7: Fluxograma área da britagem.

Nessa etapa destaca-se também o sistema de pesagem, ou seja, uma balança, para registrar a taxa de minério que será enviada para as pilhas de estocagem, bem como emitir um alarme caso haja sobrecarga na britagem. O material segue para o segundo transportador de correia, 611A-TP-0002 sendo enviado até o desviador de fluxo motorizado.

O desviador de fluxo quando posicionado para a esquerda, realiza a alimentação da usina. Quando posicionado para a direita, o minério é direcionado para seguir rota de empilhamento no pátio de estocagem.

3.7.2 Estocagem e By-Pass no Pátio de Bauxita Britada

O minério proveniente do desviador de fluxo é transportado pela correia 621B-TP-0001 para alimentar a empilhadeira 621B-ED-0001, podendo ser empilhado no pátio de bauxita bruta (não lavada), ou ramal ferroviário, ou no pátio de bauxita britada.

A empilhadeira, realiza a formação das pilhas de homogeneização, de forma a possibilitar um maior controle na formação da pilha tipo Windrow Chevrow (ALCOA, 2009).

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 na correia 621B-TP-0003 que conduz o minério para as linhas em questão.

3.7.3 Retomada do Pátio de Bauxita Britada e Alimentação da Lavagem

O minério estocado no pátio de bauxita britada é retomado através das pá-carregadeiras, que alimentam as três moegas, 621B-AL-0001, 621B-AL-0003 e 621B-AL-0002. Esses alimentadores descarregam na correia transportadora 621B-TP-0002, que direciona o material para a correia 621B-TP-0003 que alimenta a usina.

3.7.4 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 que aprimore 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, conforme esquema mostrado na Figura 8, e no período de análise, a quantidade de vagões presente nos trens era em torno de trinta e quatro vagões. Após carregado, o trem percorre uma hora de percurso, em torno de 54 km, até chegar ao porto de embarque da bauxita, local onde o virador de vagões descarrega dois vagões por vez, até que o trem esteja vazio e possa ser liberado. Esse minério é empilhado no pátio de estoque do porto de embarque de bauxita, e depois uma retomadora o direciona para uma correia que será responsável por transportar o minério para o navio.

3.7.5 Pátios

Existem, portanto, na área da mina 4 pátios: pátio das pilhas pulmão, pátio de bruta, pátio de britado e pátio de lavado.

O pátio das pilhas pulmão é responsável para completar a taxa de alimentação do britador, quando a mina está operando com um número menor de frentes de lavra. Neste pátio existem quatro pilhas pulmão.

O pátio de produto da bauxita bruta de onde é feito o carregamento de trens deste tipo de produto.

O pátio de britado que recebe o minério classificado como lavado, mas que ainda não passou pela usina. Este é usado 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. Os pátios são separados, cada um em uma parte do terreno.

O pátio de lavado recebe o produto bauxita lavada, ou seja, que passou pela usina e que será carregado nos trens e enviado posteriormente para o porto de embarque.

Além destes existe o pátio de produtos que fica na região do porto.

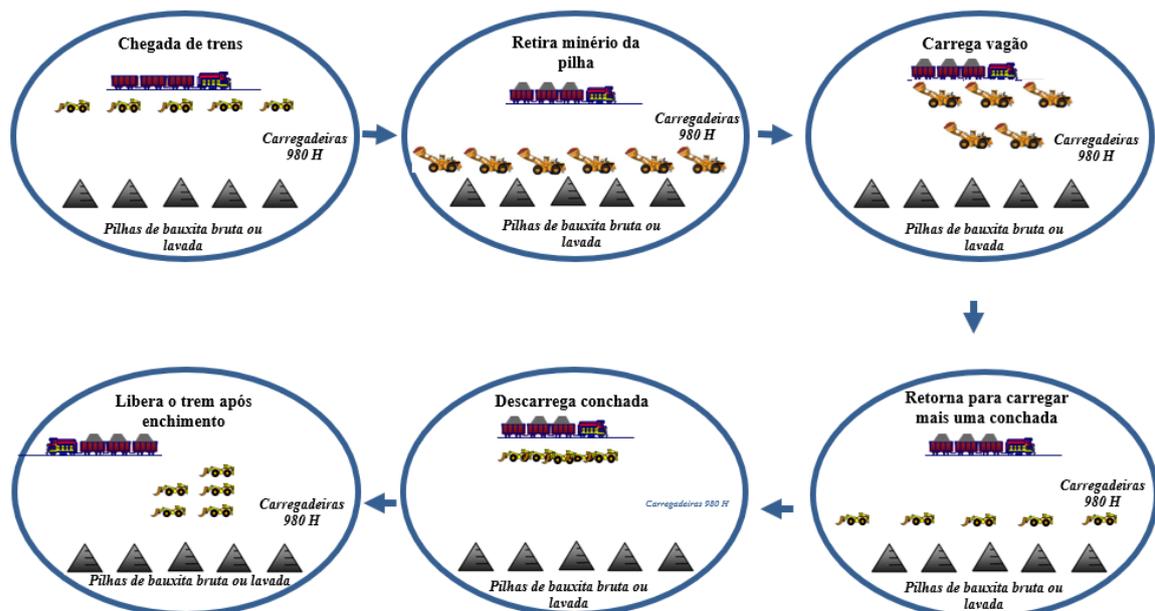


Figura 8: Fluxograma do Carregamento de Vagões (Arquivo pessoal).

3.8 Pesquisa Operacional

A expressão ‘Pesquisa Operacional’ surgiu durante a Segunda Guerra Mundial, uma vez que era necessário pesquisas para resolver problemas relacionados a operações militares. Como obteve-se êxito nessa empreitada, pesquisadores acadêmicos e empresários começaram a utilizar esse conjunto de técnicas para solução de problemas de administração (ANDRADE, 2004).

De acordo com Andrade (2004), a Pesquisa Operacional, referenciada também como PO, é um ramo da ciência administrativa que fornece mecanismos para análises de decisões, procurando a compreensão das principais características do processo e de suas dificuldades. A PO é um conjunto de técnicas quantitativas que irá auxiliar a gerência na tomada de decisão.

Pode-se citar uma característica importante da Pesquisa Operacional que é a utilização de modelos para possibilitar o processo de análise de tomada de decisões. É 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).

3.9 Simulação de Sistemas Eventos Discretos

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

Segundo Prado (2004), a simulação é uma técnica que permite a imitação de um modelo real. Os modelos desenvolvidos nos computadores estão demonstrando o funcionamento do sistema, como se estivesse posicionado em uma posição privilegiada em cada cenário

Antigamente, o modelo não era especificadamente computacional, entretanto hoje, a simulação se tornou quase sinônimo de simulação computacional digital. Um modelo computacional é um programa de computador que apresenta variáveis comportando como o sistema real que o representa (FILHO, 2008).

A simulação pode ser aplicada em vários campos. O objetivo da modelagem pode ser a expansão da produção, troca de equipamentos ou adição de novos produtos. Para dimensionar adequadamente um sistema deve-se analisar os principais gargalos, ou seja,

parte onde podem ocorrer filas. Pode-se também realizar a montagem de um novo sistema no qual planeja-se o fluxo ótimo dentro do mesmo (PRADO, 2004).

Um exemplo de área a ser analisada através da simulação é a logística, e tem sido muito difundida atualmente. O cenário pode ser o sistema de transporte utilizado por determinada empresa, como transporte ferroviário, transporte marinho e aéreo, modelo rodoviário e de elevadores (PRADO, 2004).

Um sistema pode ser considerado como um conjunto de elementos (entidades) que podem atuar individualmente ou interagir com outros elementos para a realização de uma ou mais atividades que levam um certo tempo de duração. Pode-se dizer que estas atividades causam uma mudança de estado do sistema.

O estado de um sistema pode ser caracterizado pelos valores assumidos por uma série de variáveis em um determinado instante do tempo. Estas variáveis podem ser denominadas de variáveis de estado do sistema. Quando uma destas variáveis muda de valor dizemos que ocorreu uma mudança de estado. Estas mudanças de estados normalmente 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 ocorre. Então as mudanças de estado ocorrem em instantes discretos do tempo, daí o nome de simulação a eventos discretos.

Como o tempo de duração das atividades normalmente é uma variável aleatória, além de outros tipos de variáveis aleatórias que podem estar presentes no sistema a simular, não se tem como determinar de antemão quando as mudanças de estados vão ocorrer, ou seja, não se tem como tratar sistemas deste tipo através de modelos determinísticos. Este tipo de simulação é especialmente 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, indentificando 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 deste o instante inicial até o instante final da simulação.

3.10 Elementos básicos de um modelo de simulação

Os elementos básicos intrínsecos ao modelo de simulação são:

- Entidades: são itens que podem mudar de *status*, se moverem, são afetados e afetam outras entidades, como também pelo próprio sistema e que interferem nas respostas, *output* do mesmo. Podem demonstrar objetos reais sendo esses: clientes, equipamentos e documentos; como também objetos abstratos, como informações. As entidades podem ser temporárias ou permanentes. As temporárias deslocam-se por um tempo e logo depois são eliminadas do sistema, e as permanentes circulam o tempo todo de simulação. Pode existir mais de uma entidade em um modelo e cada entidade pode possuir mais de uma atuação. As entidades possuem características que as definem, sendo essas os atributos (KELTON *et al*, 2010; RABELO, 2006).
- Atributos: são espécies de etiquetas fixadas a cada entidade, os quais podem ser usados para tomadas de decisões no momento da simulação. O mesmo atributo pode ter valores diferentes para diferentes entidades, e esses valores podem modificar ao longo da simulação, entretanto a mudança ocorre apenas naquela entidade em especial (FREITAS FILHO, 2008).
- Variáveis: são porções de informação que se movimentam no sistema, demonstrando alguma característica deste e não dependem do tipo ou quantidade de entidades existentes no modelo. Cada variável é única, e podem existir muitas em um modelo (KELTON *et al*, 2010).
- Filas: as filas atuam como um depósito de entidades que entram e saem de acordo com a mudança do *status* do sistema. A entidade pode entrar em uma fila quando esta necessita utilizar o recurso que no momento se encontra ocupado por outra entidade (KELTON *et al*, 2010; RABELO, 2006).
- Recursos: são elementos que não sofrem mobilidade no sistema, entidade estática, sendo alocados para as entidades dinâmicas. Possuem uma capacidade finita e um conjunto de estados (em espera, inativo, ocupado dentre outros). Estes estados podem ser alterados ao longo da simulação (KELTON *et al*, 2010; COSTA & PEREIRA, 2009).
- Relógio de simulação: o relógio de simulação é a variável que determina o tempo no decorrer da simulação, uma vez que este em oposição ao tempo real, não é contínuo podendo sofrer alterações ao longo dos eventos do modelo (KELTON *et al*, 2010).

- Eventos: é uma ocorrência ou episódio que podem ser programados ou não, podendo ocorrer em um instante e que poderá alterar ou não variáveis e atributos (FREITAS FILHO, 2008).

3.11 O Programa Arena®

O software Arena surgiu em 1993 pela junção de dois outros softwares chamados SIMAN e CINEMA. O SIMAN é uma linguagem de simulação que em 1983 deu nome ao primeiro software de simulação para computadores pessoais e já o CINEMA surgiu em 1984 e foi o primeiro software de animação de simulação para computadores pessoais (PRADO, 1999).

O software Arena é comercializado pela Paragon Tecnologia Ltda no Brasil, que o considera como um software capaz de desenvolver a modelagem de um sistema visualmente com objetos orientados à simulação e onde serão anexados dados sobre os processos (PARAGON, 2006). Ainda, segundo a empresa ele é um ambiente gráfico integrado de simulação, que contém todos os recursos para modelagem, animação, análise estatística e análise de resultados.

O software Arena possui uma abordagem de processos para realização da simulação, sendo assim um ambiente no qual os elementos estáticos formam um cenário definido com propriedades e regras que interagem com elementos dinâmicos (NETO & PINTO, 2004; PRADO, 1999).

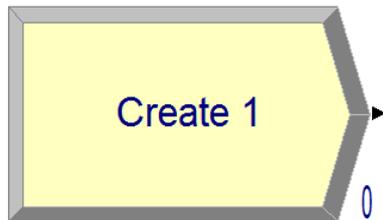
É possível realizar a construção dos modelos no Arena com os elementos disponibilizados nos templates e sendo estes denominados módulos. Os módulos podem ser:

Módulos de Fluxograma: são utilizados para a construção do modelo na área de trabalho do software, possuindo pontos de entrada e saída que permitem as conexões para criar o fluxo do processo. Nestes módulos podem ser configuradas ações referentes àquele módulo, sendo possível editar dados e inserir (COSTA & PEREIRA, 2009; RABELO, 2006).

Módulos de Dados: são módulos que não são inseridos na área de trabalho, podendo ser editados, apresentando uma lista de dados na área de planilha onde são

inseridas, removidas ou modificadas as informações (COSTA & PEREIRA, 2009; RABELO, 2006).

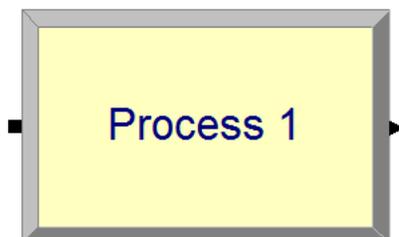
Os módulos utilizados para construção dos modelos de simulação deste trabalho são os seguintes:



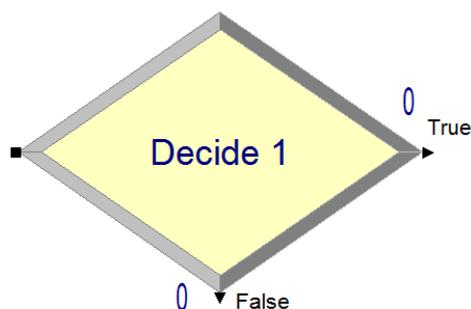
Create: é um módulo que tem a função para introduzir as entidades no modelo segundo intervalos de tempo definidos;



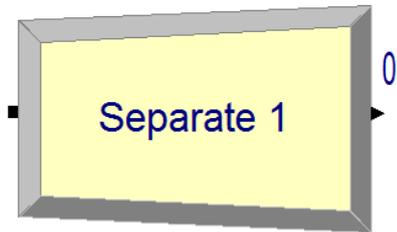
Dispose: é o módulo que tem a função inversa ao módulo *Create*. Esse módulo tem a função de retirar entidades do sistema;



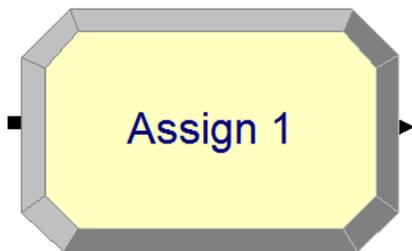
Process: é o módulo que tem a função de representar qualquer ação dentro do sistema que leve um tempo para ser cumprida. Pode também representar a ocupação de uma máquina ou operador (recurso).



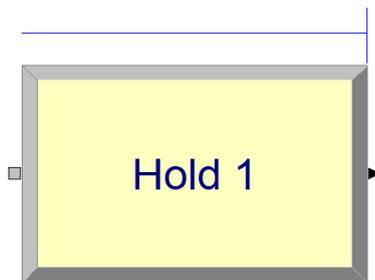
Decide: é um módulo que serve para alterar o rumo das entidades baseado em uma condição do sistema ou de um percentual probabilístico;



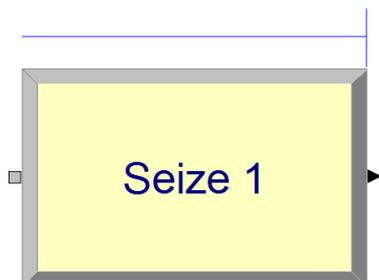
Separate: é um módulo cria duplicatas das entidades. Essas duplicatas mantêm as mesmas características da entidade original.



Assign: é o módulo que serve para alterar ou associar valores a variáveis, atributos de entidades, alterar a figura das entidades e outros parâmetros ou variáveis do sistema.



Hold: é o módulo no qual a entidade aguarda que uma condição aconteça para prosseguir para outro módulo.



Seize: esse módulo aloca unidades de um ou mais recursos para uma entidade.



Release: é usado para liberar unidades de um recurso do qual uma entidade tenha previamente se apoderado.

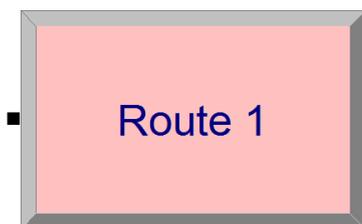


estatísticas em pontos do modelo escolhidos pelo usuário para serem mostradas depois nos relatórios de saída.

Record: serve para armazenar acumuladores de valores de variáveis e



Station: esse módulo define uma estação, ou conjunto de estações, correspondente a um local físico ou lógico onde o processo ocorre.



Route: esse módulo transfere uma entidade para uma estação especificada ou a próxima estação na sequência de visitação definida para a entidade.

Os módulos Stations e Routes foram empregados neste trabalho principalmente como recursos para melhorar a animação dos modelos de carregamento de vagões.

O “*Input Analyzer*” é uma ferramenta do Arena® que possibilita a construção de uma distribuição de probabilidade, a partir de dados de processos coletados em campo, a qual irá demonstrar o comportamento daquela variável.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma vez que a mineração possui sistemas extremamente complexos, apresentando grande número de variáveis aleatórias, a simulação apresenta-se como uma maneira de obter respostas a uma série de questionamentos, como ‘para que simular tais operações?’. Uma resposta coerente é que quando realiza-se a simulação de certas operações, conseqüentemente é feito um gerenciamento das mesmas e a otimização do processo.

A simulação funciona como um provedor de subsídios para uma tomada de decisão mais confiável. O uso de um modelo de simulação ocorre segundo a Figura 9:

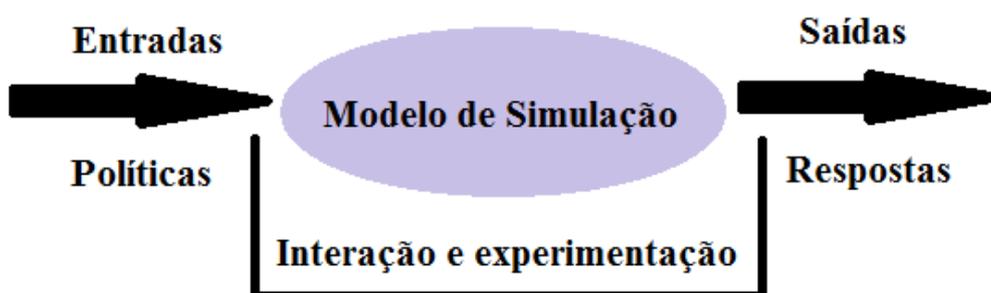


Figura 9: Uso do modelo de simulação.

Realizando a simulação, é possível analisar cenários diferentes para o processo sem a geração custos e de forma rápida.

Nesse estudo, são construídos modelos de simulação que irão interpretar as operações que ocorrem no processo de britagem e carregamento de vagões. Para isso, foram seguidas as fases para 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 britagem possui diversas operações e, para facilitar a visualização das mesmas, foi construído um Diagramas de Ciclos e Atividades (DCA) do processo. O

DCA é uma ferramenta escolhida para representar graficamente os modelos de simulação, constituída de vários elementos interligados sendo muito prática para realizar representações do sistema com uma forte estrutura de filas.

O DCA é composto por entidades, atividades e filas. As entidades constituem-se em elementos primários no modelo. São identificadas por linhas e representam as entidades físicas do sistema. As filas são identificadas por um círculo e representam a espera das entidades para ocorrência de uma atividade. As atividades são representadas por retângulo e demonstram as atividades que ocorrem no sistema. Os desvios foram realizados para alimentação da usina ou empilhamento nos pátios.

Pode-se visualizar o DCA da Britagem na Figura 10.

No DCA pode-se identificar, em vermelho a bauxita bruta e em verde a bauxita lavada, as duas entidades que representam o minério. As outras entidades do processo são as pá-carregadeiras, em azul e a mina em preto.

As variáveis que influenciam o processo são o intervalo de chegada de minério transportado por caminhões e pá-carregadeiras na moega, o tempo de ciclo das pá-carregadeiras dos pátios, a massa transportada pelo caminhão e carregadeiras, a produtividade do circuito, a manutenção dos equipamentos e linhas da usina. As variáveis de resposta são as massas empilhadas, a massa de bauxita lavada na usina, massa da pilha pulmão que foi britada, massa retomada da pilha de britado e utilização dos equipamentos.

Os intervalos de chegada dos caminhões e tempos de ciclo das pá-carregadeiras na retomada do britado, massas das carregadeiras trabalhando nas pilhas pulmão e de britado foram adquiridos em campo com o auxílio de um cronômetro, rádio e preenchimento de tabelas. Os valores de manutenção dos equipamentos e produtividade foram retirados de planilhas de controle.

Foram determinadas distribuições estatísticas para as variáveis de entrada do modelo: tempos de ciclo de pá-carregadeiras e intervalos de chegadas de caminhões e pá-carregadeiras, utilizando o *input analyser*. Quando não se conseguiu uma distribuição de probabilidade teórica que se ajustasse aos dados utilizou-se uma distribuição empírica que corresponde à função de repartição ou da distribuição acumulada crescente da variável em estudo estimada através dos dados medidos. Para as demais variáveis foram adicionados valores constantes ou valores médios, como no caso da produtividade, massa dos caminhões, manutenções dos equipamentos.

Britagem

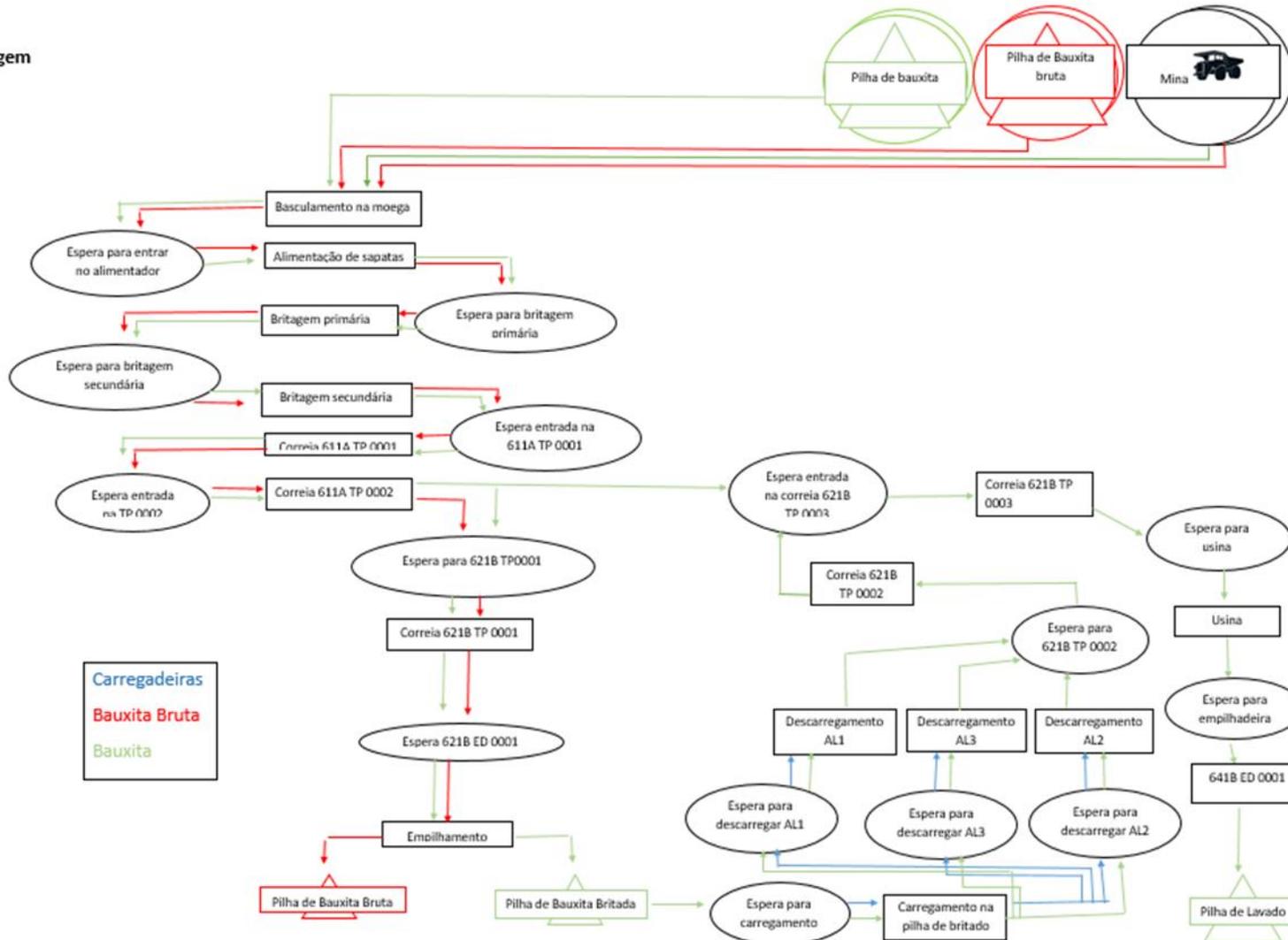


Figura 10: DCA referente ao processo da Britagem.

No carregamento de vagões construiu-se o DCA referente às operações que ocorrem no carregamento de vagões. O carregamento se dá início com a chegada de trens aos pátios, de bauxita lavada ou bruta. As pá-carregadeiras retomam o material que foi empilhado nos pátios, e preenchem um vagão por vez. Após o preenchimento de todos os vagões, o trem está cheio e é liberado para o transporte. Pode-se ver o DCA referente ao carregamento de vagões na Figura 11.

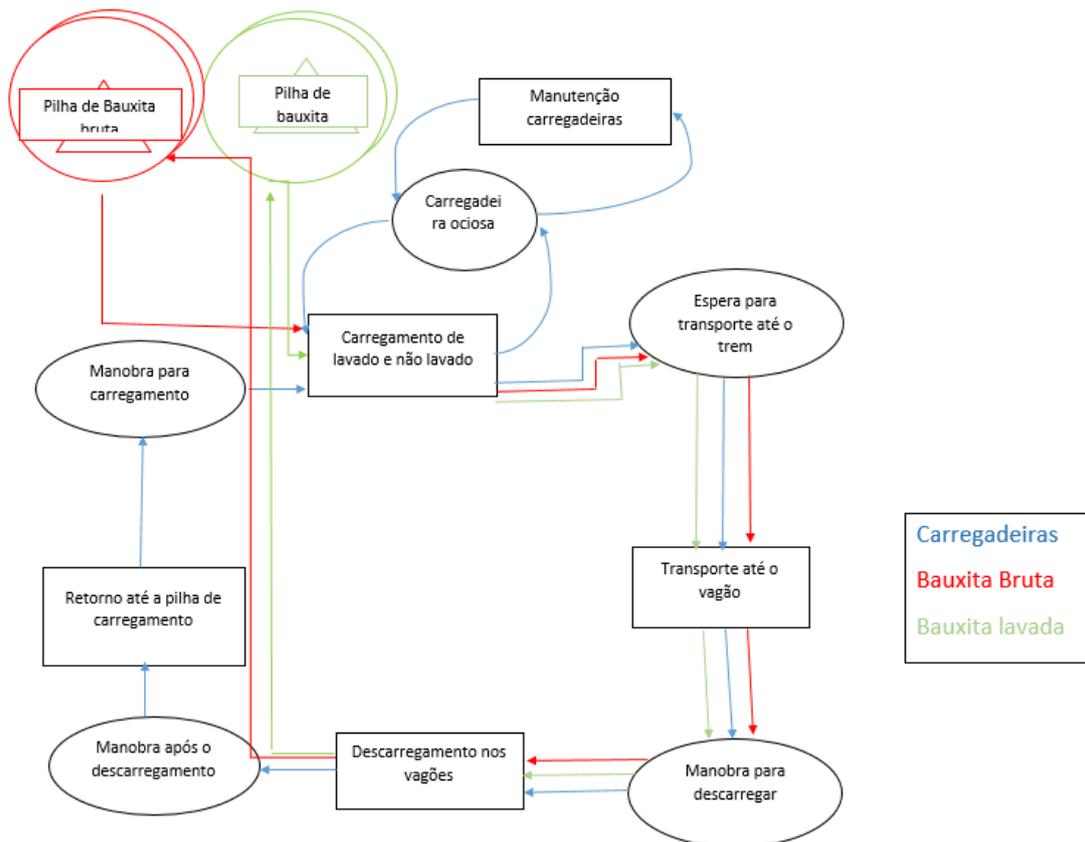


Figura 11: DCA referente ao carregamento de vagões.

No DCA pode-se identificar, em vermelho a bauxita bruta e em verde a bauxita lavada, as duas entidades que representam o minério. A outra entidade do processo é a pá-carregadeira, em azul.

As variáveis que influenciam o processo são o intervalo de chegadas dos trens aos pátios, o tempo de ciclo das pá-carregadeiras, o número de vagões presente nas locomotivas, a massa de minério dos vagões e a massa de minério das conchadas. As variáveis de resposta são o número de trens que chegaram durante o tempo de simulação, a produção total de bauxita bruta e lavada que foi transportada, o tempo de fila e utilização das pá-carregadeiras e tempo de fila dos trens.

Os intervalos de chegada dos trens e número de vagões das locomotivas foram adquiridos em controles da operação ferroviária. Os outros dados foram adquiridos em campo com o auxílio de um cronômetro, rádio e preenchimento de tabelas.

Foram determinadas distribuições estatísticas utilizando o *input analyser* para cada variável de entrada do modelo (intervalo de chegadas, número de vagões, massas de vagões, massas por conchadas e tempos de ciclo das pá-carregadeiras). Quando não se conseguia um bom ajuste estatístico, foi utilizada a distribuição empírica. A capacidade da concha da pá-carregadeira é de 10 t e do vagão 81,250 t.

5. DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS

Segundo Paramcapos e Cabral (2018), os sistemas podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos. Os estáticos são sistemas nos quais a variação do tempo não promove alterações no modelo, como ocorre em problemas de otimização. Os dinâmicos são sistemas nos quais as variáveis de estado sofrem alterações com o tempo, como uma variável que possui uma distribuição estatística na simulação.

Os processos escolhidos para modelagem, a britagem e o carregamento de vagões, são considerados dinâmicos já que representam sistemas nos quais as variáveis de estado sofrem alterações com o tempo.

O sistema dinâmico se divide em determinístico e estocástico, quanto aos valores de entrada e saída do modelo. O determinístico é quando o modelo possui um grupo de entrada de dados que resultará em apenas um conjunto de resultados. O estocástico é quando o modelo é composto de um grupo de variáveis aleatórias como dados de entrada. O estocástico, por sua vez, pode possuir variações de estado, sendo contínuos ou discretos. Nos contínuos, a alteração de estado das variáveis ocorre de maneira contínua e nos discretos, a alteração de estado das variáveis acontece em pontos discretos de tempo.

De acordo com 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 utilizada para demonstrar o transporte de uma certa massa em um tempo determinado. Quanto menor a massa discretizada, Figura 12, 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 uma discretização por tempo também.

Nos modelos de britagem construídos temos 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.

Foi utilizado 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 ele ocorre em que existe um equipamento por onde o fluxo passa, ou seja, através dos britadores, desviadores de fluxo, empilhadeira e diferentes 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 um 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. E 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.

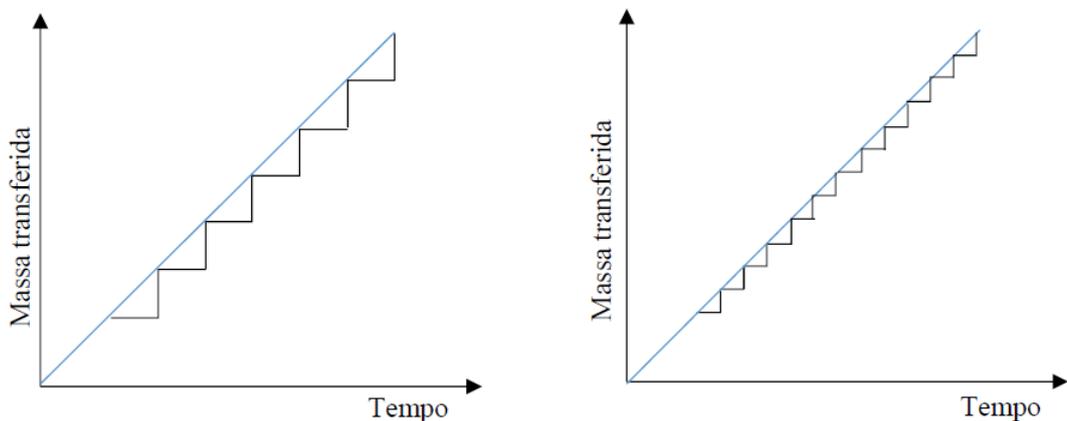


Figura 12: Calibração do modelo.
Fonte: Ouellet (2017).

Foram construídos 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. 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.

Esta subdivisão se deu principalmente pelas restrições da versão utilizada do Arena, pois não comportaria o número total de módulos de programação (além de outras restrições) que seria necessário para a criação de um único modelo que considerasse a possibilidade de se trabalhar com o circuito de britagem de bruta e de lavado, tanto da parte de britagem quanto da parte de carregamento.

Esta subdivisão tem a vantagem de se ter modelos relativamente mais simples que não afetaria 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 elas participam pudessem ser realizadas com um melhor desempenho. Existem sete pá-carregadeiras que podem ser usadas nas operações de carregamento de vagões com minério de bauxita bruta ou lavado, 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 com ela 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 melhor distribuição das pá-carregadeiras que atendesse melhor os objetivos desejados.

5.1 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 utilizados os fluxos de decisão abaixo, o que proporcionou que fossem inseridas as condições de operação que ocorrem no processo.

Parada de uma linha da planta

Quando ocorre a parada de uma linha da usina de lavagem, verifica-se se o pátio ainda tem capacidade de receber material via empilhamento, Figura 13. 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 do britador é diminuída.

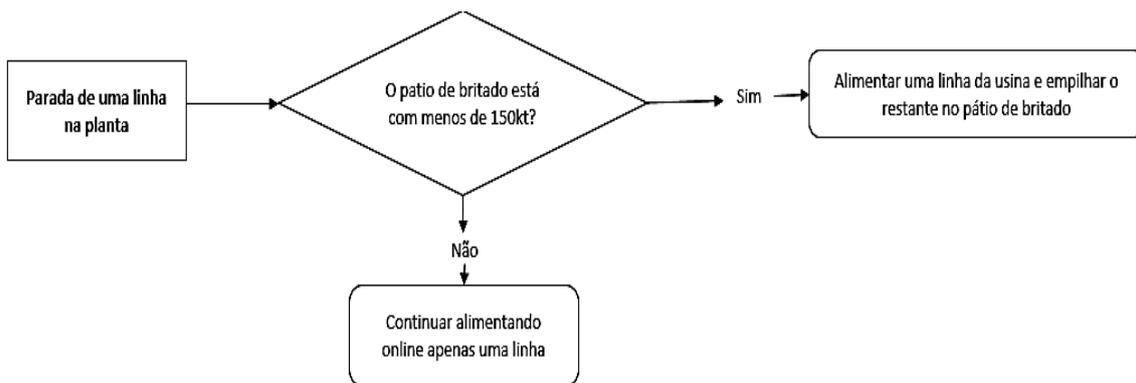


Figura 13: Parada de um linha na planta.

Parada geral da planta

Quando ocorre a parada das duas linhas da usina, Figura 14, 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 a previsão de retorno e se o pátio pode receber mais material, e assim empilha o material. Se não houver previsão e não houver espaço aguarda até que possa empilhar.

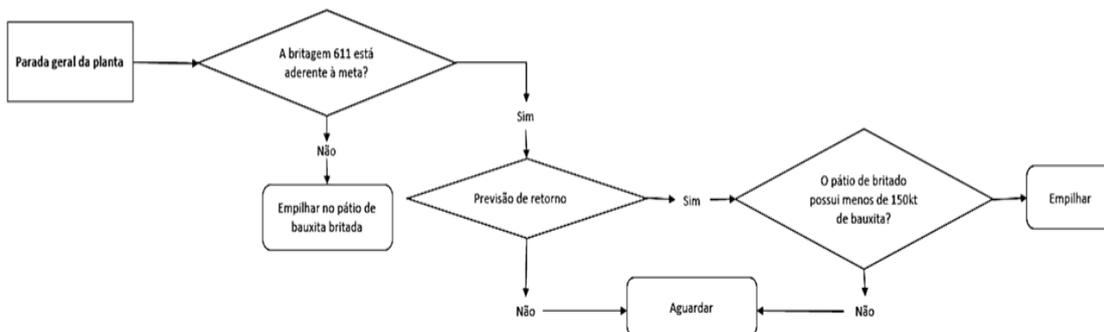


Figura 14: Parada geral da planta.

Redução na capacidade de alimentação pela mina

Quando ocorre a redução do número de frentes por parte da mina, Figura 15, deve-se avaliar se a britagem está aderente ao plano de produção. Se estiver, ocorre a retomada do pátio de bauxita britada para completar a taxa que alimenta a usina. Se não estiver aderente à meta, completa-se a taxa com material das pilhas pumão.

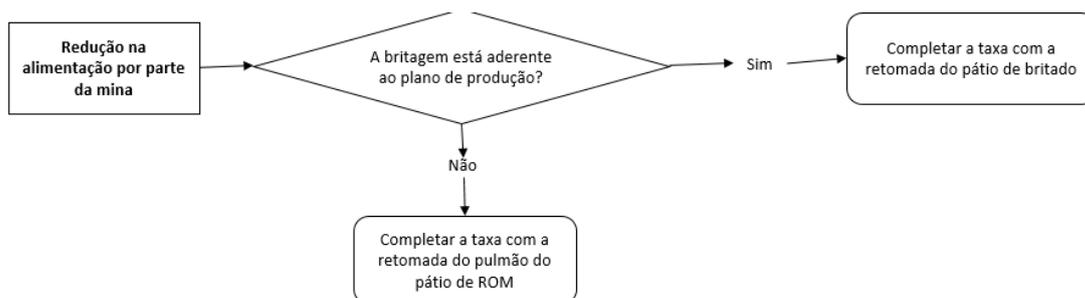


Figura 15: Redução na alimentação por parte da mina.

Parada na britagem

Quando ocorre a parada a britagem, Figura 16, 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.

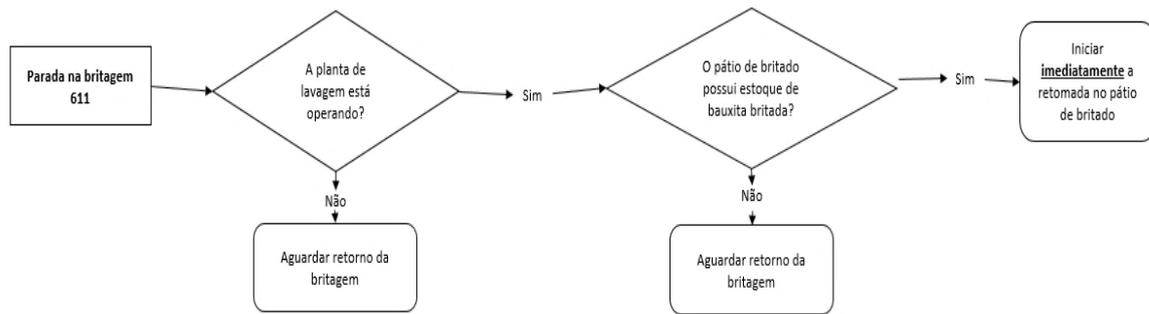


Figura 16: Parada na britagem.

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, já que ocorrem perdas no processo até a entrada da usina. 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.

Através dessas informações e de dados adquiridos em campo, foi possível construir o modelo de simulação da britagem, retratado na Figura 17.

Os termos utilizados nas expressões de vários módulos, como hold, decide, assign e create indicados nas descrições dos modelos estão de acordo com o programa Arena, como por exemplo: <= significa 'menor ou igual', || significa 'ou', && significa 'e', State(britador) significa 'o estado em que se encontra o recurso britador'.

A tabela 1 que se encontra no Apêndice apresenta o significado dos nomes de variáveis, atributos e distribuições estatísticas utilizadas no modelo de britagem de bauxita lavada.

Para uma melhor descrição do modelo apresentada em sequência subdividiu-se o modelo em uma série de circuitos.

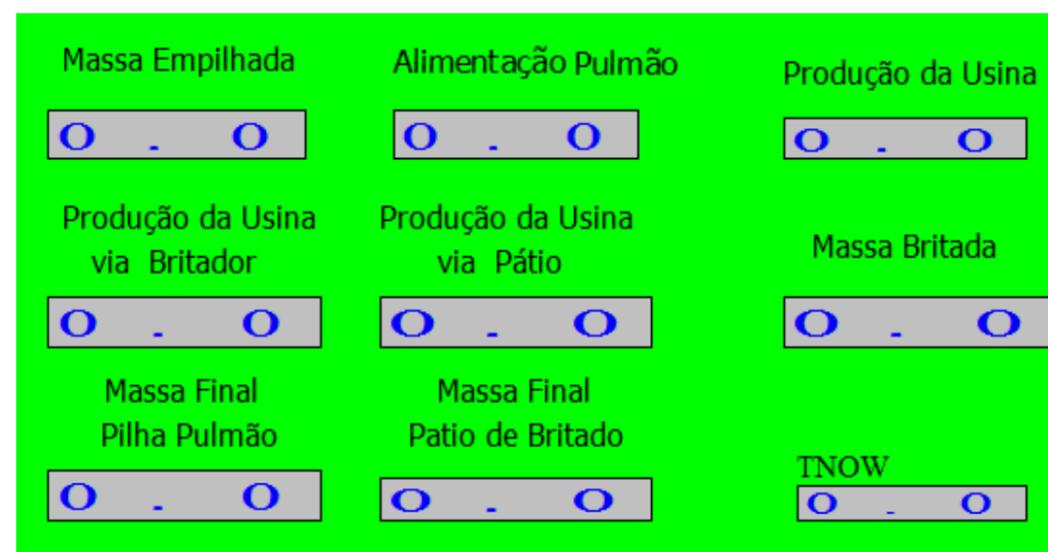
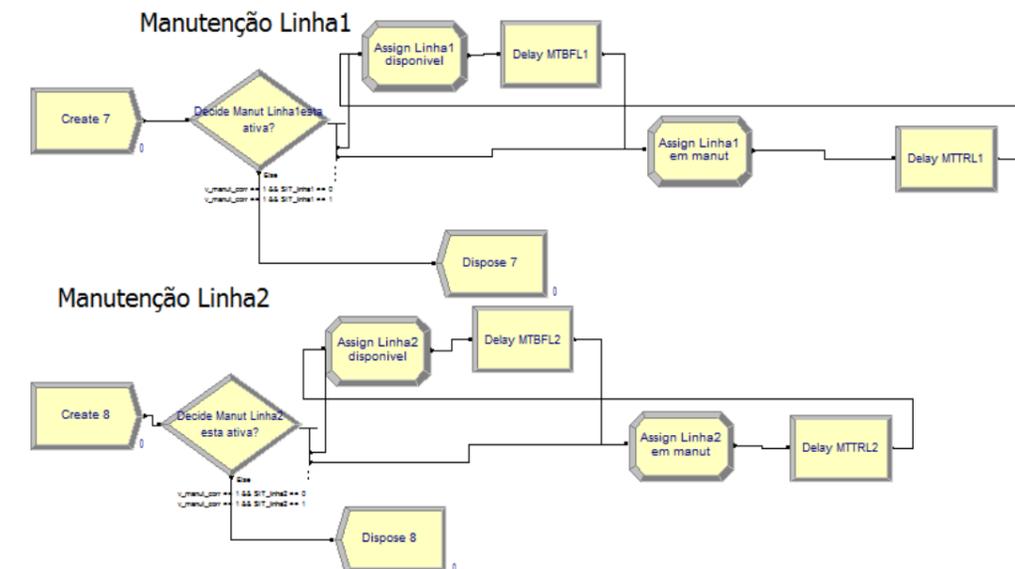
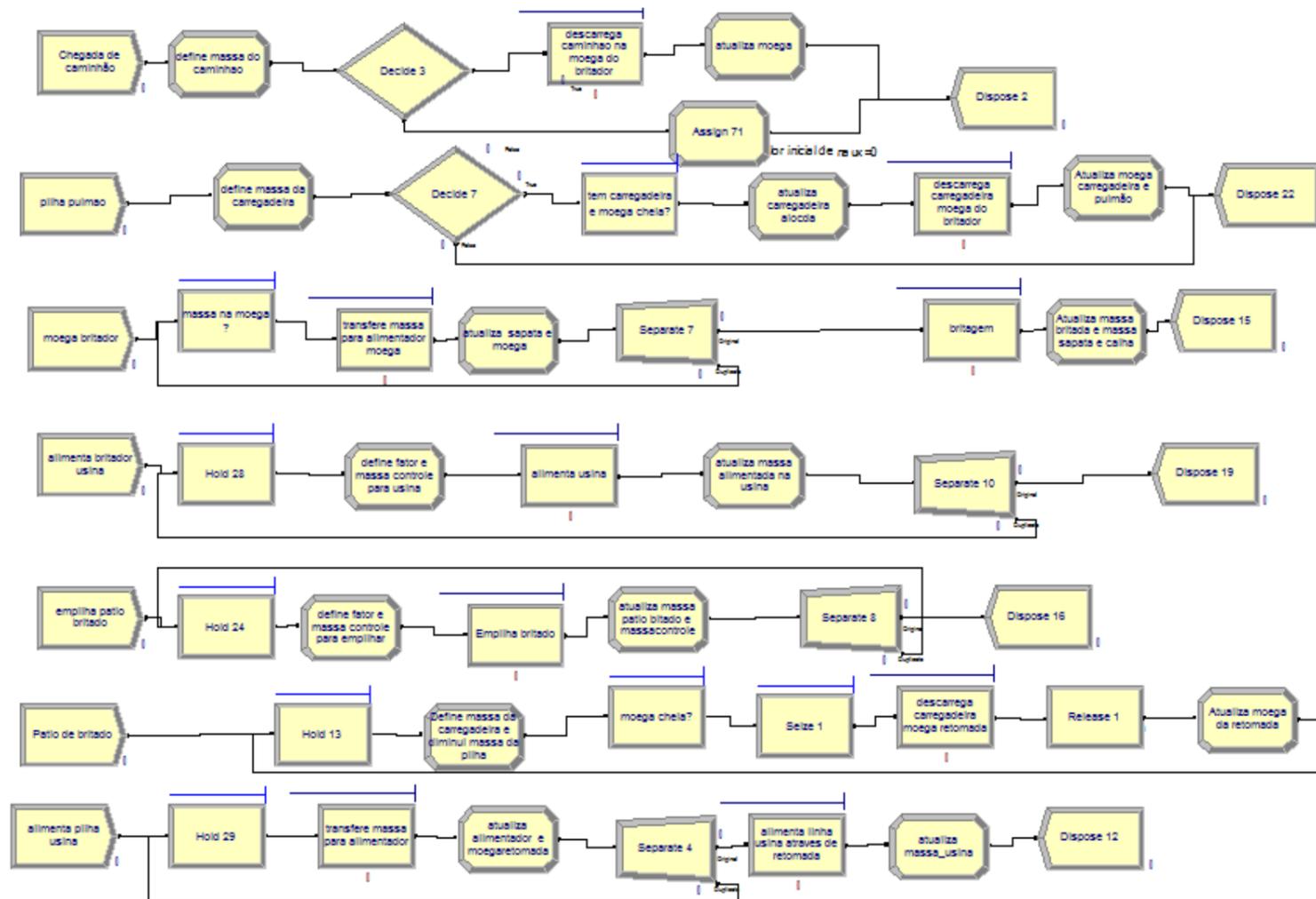


Figura 17: Modelo da britagem de bauxita lavada.

Cada etapa do modelo está descrita a seguir:

As variáveis que devem ser determinadas antes da simulação são: prodsapata (produtividade do alimentador de sapatas), nfrentes (número de frentes da mina em operação), ncarusina (número de carregadeiras que alimentam a usina através de retomada), prodalimentador (produtividade da retomada), v_manut_corr (manutenção), ncarred (número de carregadeiras disponíveis para a retomada pulmão) e naux (número de carregadeiras alocadas para realizar a retomada do pulmão).

1° circuito: Chegada caminhão

O objetivo desse percurso é promover a descarga dos caminhões que chegam na moega de alimentação do britador. A entidade deste circuito são os caminhões.

“Create chegada de caminhões” define o tempo de chegada das entidades caminhões. Pode-se colocar um valor fixo de intervalos de chegada ou uma distribuição de probabilidade com tempos adquiridos em campo.

“Assign define massa do caminhão” adiciona a cada caminhão o atributo “massacaminhão” que recebe o valor de 37 t, de capacidade dos caminhões.

“Decide 3” verifica a condição de que “massa_moega+massacaminhao <= capmoega”, que impõe que a massa a ser acumulada na moega deva ser menor que a capacidade deste equipamento. Se a moega estiver cheia, o caminhão vai descarregar na pilha pulmão.

“Process descarrega caminhão na moega no britador” será uma ação “seize delay release” no qual o recurso é a “moega do britador”. Dessa forma, o recurso moega do britador será ocupado, a descarga é efetuada após um certo tempo, e logo após o recurso é liberado. Deve ser adicionado um tempo médio, ou uma distribuição conhecida, em que ocorrem as descargas. Na definição do recurso moega do britador considera-se que até duas entidades entre caminhões ou pá-carregadeiras podem ser descarregados simultaneamente.

“Assign atualiza moega” atualiza o valor de massa da moega através da expressão “massa_moega =massa_moega+massacaminhao” após a descarga da massa do caminhão.

“Assign 71” atualiza a massa da pilha pulmão, fazendo massa_pulmão=massa_pulmão+massacaminhao.

Dispose 2 retira ou libera a entidade do modelo.

2° circuito: Pilha pulmão

O objetivo desse circuito é possibilitar a retomada de massa da pilha pulmão através de pá-carregadeiras e a descarga das mesmas na moega de alimentação do britador.

“Create Pilha pulmão”- Neste módulo é criada a entidade “carpulmao” referente às carregadeiras que retomam material das pilhas pulmão de bauxita lavada. Esta entidade não é a pá-carregadeira, mas é ela que vai alocar uma das pá-carregadeiras para fazer a retomada da pilha pulmão. Adiciona-se um tempo de intervalo que corresponde de quanto em quanto tempo as carregadeiras surgem para a descarga na moega. Então o intervalo de chegada estará ligado ao tempo de ciclo das pá-carregadeiras. Está previsto que a primeira chegada vai ocorrer logo no início da simulação, mesmo que nenhuma carregadeira tenha sido escalada para a retomada da pilha pulmão. Neste caso a entidade entra, mas sai mais à frente.

“Assign define massa da carregadeira”: é definido o atributo “massacar” por meio de uma distribuição de onde será amostrado o valor da massa carregada pela concha da carregadeira. Poderia ser usado também um valor médio constante.

Decide7: Neste módulo são definidas as seguintes condições Tipo de minério == "lavado" &&nfrontes <3 && massabrit <metabrit && massa_pulmao > 0 && ncarred <> 0, para que a descarga possa ser realizada. O tipo de minério é lavado. O número de frentes deve ser menor que 3. A massa que está passando na britagem ainda não deve ter atingido a meta, a pilha pulmão de lavado deve possuir massa e deve haver carregadeira disponibilizada para realizar a retomada da pilha pulmão. Se nenhuma carregadeira foi alocada para esta tarefa, caso em que ncare=0, a entidade sai do circuito.

“Hold tem carregadeira e moega cheia?”: Neste módulo são impostas as condições “naux < ncarred && massa_moega+massacarr <= capmoega para que haja a alocação da pá-carregadeira” pela entidade carpulmao. A primeira é para saber se tem carregadeira disponível para alimentar a moega. Se o número de carregadeira já alocadas, naux, é menor que o número total de carregadeiras disponíveis para essa atividade, ncarred. Se forem iguais, não tem carregadeira disponível.

“Assign atualiza carregadeira alocada” a variável “naux” será atualizada para “naux = naux+1”, o que indica que uma carregadeira será alocada. Este acréscimo deve ser feito antes de se começar a descarga para que durante a mesma se chegar uma nova entidade carpulmao não se corra o risco de tentar alocar mais carregadeiras do que o número reservado para tal tarefa.

“Process descarrega carregadeira moega do britador”- Neste módulo tem-se uma ação “seize delay release” no qual o recurso é a “moega do britador”, juntamente com a carregadeira que é alocada neste módulo. Será alocada uma das carregadeiras que foram designadas como o grupo disponível para essa atividade. Essas carregadeiras são as mesmas que exercem as atividades de retomada de bauxita britada no pátio de britado e que realiza o carregamento de vagões. Então, serão separadas de acordo com a operação. Terminada a operação a moega do britador e a carregadeira são liberadas.

“Assign Atualiza moega carregadeira e pulmão”- Neste módulo é atualizada a massa da moega por meio da expressão “massa_moega = massa_moega+massacarr”, a massa retirada da pilha através da expressão “massa_pulmao = massa_pulmao-massacarr” e o número de carregadeiras alocadas por meio da expressão “naux = naux-1”, já que agora uma carregadeira foi liberada e a massa que sai da pilha pulmão, através da expressão massasaidapulmao+massacarr.

Através do módulo dispose 22, a entidade carpulmão sai do modelo.

3° circuito: moega britador

O terceiro circuito vai permitir que uma massa da moega passe pelo britador de forma contínua por meio do alimentador de sapata e do britador para uma calha virtual que irá posteriormente alimentar as correias transportadoras tp611A.

“Create moega britador”: entra uma entidade por vez, com o máximo de chegada de um. Uma entidade passa pelo create moega britador uma única vez e será responsável para controlar a transferência de forma contínua de sempre 1 tonelada para o alimentador de sapata, depois para o britador e depois para a calha virtual que vai alimentar as primeiras correias. Esta transferência vai se dar de forma contínua desde que haja no mínimo uma massa de uma tonelada na moega e desde que o britador esteja ativo, condição verificada no hold “massa na moega?”

“Hold massa na moega”- Neste hold são verificadas as condições para que possa haver a transferência da massa de 1 tonelada (valor da massa discreta) para o alimentador de sapata. O valor dessa massa discreta é armazenado na variável massa.

Estas condições são as seguintes:

```

massa_moega > 0 && STATE(britador) <> FAILED_RES && ( ( (((SIT_linha1 ==
1) + (SIT_linha2== 1) )== 1) &&( (massabrit < metabrit && massa_patiobritado <=
cap_pilha_britado &&STATE(empilhadeira) <> FAILED_RES) || massa_patiobritado
> cap_pilha_britado) ) || ( ( SIT_linha1 == 1 && SIT_linha2 == 1) &&( (massabrit
< metabrit && massa_patiobritado <= cap_pilha_britado &&STATE(empilhadeira)
<>

```

```

FAILED_RES)||((massabrit>=metabrit&&(MN(amarca1+MTTRL1,amarca2+MTTRL2)
-TNOW>= 0.5) && massa_patiobritado <= cap_pilha_britado &&
STATE(empilhadeira) <> FAILED_RES)) ) || (( SIT_linha1 == 0 && SIT_linha2 ==
0)&& massabrit< metabrit) ), ou seja, deve haver massa na moega, o britador não deve
apresentar falha, e as demais condições presentes no fluxograma de decisão
relacionadas ao empilhamento ou alimentação das linhas da usina via britador
diretamente.

```

“Process transfere massa para alimentador moega”: Neste process com uma ação “seize delay release” é feita a transferência da massa discreta de uma tonelada (variável massa) da moega para o alimentador da moega . O tempo de transferência em minutos é calculado através da expressão “60*massa/prodsapata” , onde prodsapata é a produtividade do alimentador de sapata em t/h que corresponde à taxa de britagem. Considerou-se um recurso sapata que fica indisponível durante esta transferência com capacidade igual a 1 , portanto impedindo a entrada de outra massa de 1 tonelada enquanto este recurso não for liberado.

“Assign atualiza sapata e moega”: = Neste assign é atualizada a massa da moega, retirando a massa que passou para o alimentador de sapatas por meio da expressão “massa_moega = massa_moega-massa”. Atualiza-se também a massa do alimentador de sapatas que recebe a massa enviada por meio da expressão “massa_sapata = massa_sapata+massa”.

“Separate”: Neste módulo a entidade controladora é duplicada para que ela que controla o fluxo da massa de uma tonelada vá para o módulo seguinte de britagem,

mas que possa também retornar ao módulo Hold “massa na moega” para executar o mesmo processo com mais uma tonelada e assim por diante. Desta forma é que se dá o processo contínuo.

“Process britagem”: Neste módulo com uma ação “seize delay release” simula a passagem da massa discreta pelos britadores. O tempo de transferência foi admitido como constante e igual também à “massa*60/prodsapata”. O recurso britador é adicionado neste módulo, com uma capacidade igual a 1.

“Assign Atualiza massa britada e massa sapata e calha”: Neste módulo é atualizada a massa presente no alimentador de sapatas por meio da expressão “massa_sapata = massa_sapata-massa” já que uma massa de 1 t saiu do alimentador e foi para o britador, a massa britada, massabrit, que é incrementada do valor da massa (1 tonelada) por meio da expressão $massabrit = massabrit + massa$, e da massa da calha virtual que recebe essa massa de 1t, por meio da expressão: $calha_{tp611A} = calha_{tp611A} + massa$. Observa-se que massabrit no início da simulação não necessariamente é zero, pois a simulação pode ter iniciado já com uma massa britada acumulada anteriormente em outro período. Essa massa é utilizada para verificar se ela está aderente à meta. A utilização desta calha virtual foi necessária para permitir a continuação do fluxo contínuo, ou seja, admite-se aqui que assim que a massa discreta de uma tonelada tenha terminado de passar pelo britador ela tenha sido transferida para a correia transportadora tp611A.

“Dispose 15”: libera a entidade.

4º circuito: alimenta britador usina

Esse circuito tem por objetivo enviar material britado para a usina.

“Create alimenta britador usina”: Neste módulo uma entidade entra no sistema uma única vez e será responsável para controlar a transferência de forma contínua de sempre 1 tonelada das correias TP01 para as linhas da usina.

“Hold 28”: Neste hold são verificadas as condições para que possa haver transferência de massa do britador até a usina. Estas condições estão presentes na expressão:

“calha_tp611A > 0 && ((SIT_linha1 == 0 && SIT_linha2 == 0) || (((SIT_linha1 == 1)+(SIT_linha2== 1)) == 1)) &&(Tipo de minerio == "lavado") && massabrit < metabrit, ou seja, é necessário que tenha sido transferido material para a calha_tp611A, que pelo menos uma das linhas da usina esteja em operação , que a meta da britagem não tenha sido atingida ainda e que o tipo de minério seja a bauxita lavada.

“Assign define fator e massa controle para usina”: Neste assign é definido o valor da massa discreta que irá alimentar a usina , através da multiplicação da massa de uma tonelada por um fator. A massa de uma tonelada (variável massa) após passar pelas correias TP01 e TP02 chega até o divisor de fluxo, a partir do qual uma parte da massa que ali chega, pode se dirigir para a alimentação da usina ou para o empilhamento. A variável parcela representa a parcela da massa que é direcionada para o empilhamento.

O valor do atributo é definido através da expressão booleana: “fator = (SIT_linha1 == 0 && SIT_linha2 == 0)*1+(((SIT_linha1 == 1)+(SIT_linha2== 1)) == 1)*(1-parcela)” , ou seja, se as duas linhas da usina estiverem em operação não haverá divisão de fluxo.

Se uma das linhas estiver parada, do material que passou pelo britador uma parte só é que vai para usina e a outra para o empilhamento. Neste caso o fator será menor do que 1. Quando a duas linhas estão operando todo o material que passa pelo britador vai para usina, ou seja, o fator será igual a 1.

A massa que irá para a usina será definida então pela expressão $massadiscreta=massa*fator$.

“Process alimenta usina”: Neste process é considerada uma ação “seize delay release” onde se faz a transferência da massa discreta para uma das linhas da usina. Foi considerada a existência de um recurso “usina virtual1”, e com o tempo de transferência em minutos constante e igual a “ $massadiscreta*60/(prodsapata)$ ”. O recurso usina virtual 1 serve também para indicar que a usina foi alimentada diretamente via britador e não proveniente de massa presente no pátio de britado.

“Assign atualiza massa alimentada na usina”: Neste assign é acumulada a massa que entra na usina através de “ $massa_usina = massa_usina+massadiscreta$ ”, a massa que entra na usina via britador por meio de $massabritadorusina = massabritadorusina$

+massadiscreta, e acumula na variável massabritador a massa que passou pelo britador deste o início da simulação, através da expressão $massabritador = massabritador + massadiscreta$.

A variável “calha_tp611A = calha_tp611A-massadiscreta” é atualizada também pois é retirada a massa discreta que está indo para a usina.

“Separate”: é adicionado o separate para que a duplicata da entidade controladora corresponde à massadiscreta possa retornar para executar o mesmo processo simulando o processo contínuo, enquanto a entidade original sai do circuito através do Dispose 19.

5° circuito: empilha pátio britado

O objetivo deste circuito é direcionar a massa que passa pelo divisor de fluxo para o empilhamento no pátio de britado.

“Create empilha patio britado”: Este módulo é responsável por introduzir uma entidade de controle uma única vez. Essa entidade chega no instante 0.001, pois todas as entidades controladoras entram no início do circuito para garantir um envio contínuo de material para o equipamento seguinte (mesma condição dos outros).

“Hold 24”: Neste hold são verificadas as condições para que possa haver a transferência do valor da massa discreta para a empilhadeira e daí para o pátio de britado.

Estas condições estão presentes na expressão: $calha_tp611A > 0 \ \&\& \ (Tipo \ de \ minerio == "lavado") \ \&\& \ (\ (\ (\ SIT_linha1 == 1 \ \&\& \ SIT_linha2 == 1) \ \&\& \ (massabrit < metabrit \ \&\& \ massa_patiobritado <= cap_pilha_britado \ \&\& \ STATE(empilhadeira) <> FAILED_RES) \ || \ (massabrit >= metabrit \ \&\& \ (MN(amarca1+MTTRL1,amarca2+MTTRL2) - TNOW >= 0.5) \ \&\& \ massa_patiobritado <= cap_pilha_britado \ \&\& \ STATE(empilhadeira) <> FAILED_RES)) \) \ || \ (\ ((SIT_linha1 == 1) + (SIT_linha2 == 1)) == 1) \ \&\& \ massa_patiobritado <= cap_pilha_britado \ \&\& \ (STATE(empilhadeira) == IDLE_RES \ || \ STATE(empilhadeira) == BUSY_RES) \) \)$, ou seja, é conferido se tem material na calha da tp611A, e as

demais situações presentes no fluxograma de decisão em que pode ocorrer o empilhamento.

“Assign define fator e massa controle para empilhar”: Neste assign são definidos a variável fator e o atributo massa de controle para empilhar no pátio de britado, que é a massa discreta. A expressão estabelece o valor deste atributo $(SIT_linha1 == 1 \ \&\& \ SIT_linha2 == 1) * 1 + (((SIT_linha1 == 1) \ + (SIT_linha2 == 1)) == 1) * parcela$. Se as duas linhas estão paradas então todo o material proveniente do britador vai para o empilhamento. Se somente uma das linhas está em operação, então uma parte vai para o empilhamento e a outra para a usina.

“massadiscreta = massa*fator” define a porcentagem de material que será empilhado.

“Process empilha britado”: É através deste módulo que ocorre o empilhamento de bauxita britada, sendo usado um “seize delay release” em que o tempo de empilhamento da massa discreta é fixado pela expressão: “massadiscreta*60/(prodsapata)”. Neste módulo é definido o recurso empilhadeira com capacidade igual a 1.

“Assign atualiza massa patio britado e massacontrole”: Neste módulo é atualizada a massa que está presente no pátio de britado através da expressão “massa_patiobritado = massa_patiobritado+massadiscreta”, a massa que foi empilhada deste o início da simulação por meio de massaempilhadabritado = massaempilhadabritado+massadiscreta e também a massa que passou pelo britador deste o início da simulação, através da expressão massabritador = massabritador + massadiscreta.

A variável “calha_tp611A = calha_tp611A-massadiscreta” é também atualizada, pois é retirada a massa discreta que está indo para o pátio de britado.

“Separate”: Este separate tem a mesma função de garantir o processo contínuo de empilhamento, que o separate do 4º circuito. A entidade original sai do circuito através do dispose 16.

6º circuito: pátio de britado

Esse circuito possibilita a retirada de massa no pátio de britado e alimentação das moegas de retomadas que estão presentes no pátio de britado.

No módulo “Create pátio de britado” serão definidas as entidades que vão controlar a transferência de material da pilha de britado para a moega que vai alimentar a correia que transportará o material até a usina. Será criada uma entidade para cada carregadeira a ser usada na retomada no início da simulação.

O número máximo de chegadas ou de entidades é dado por `ncarusina` que vai indicar o número de carregadeiras a serem usadas na retomada de material do pátio de britado . O intervalo entre chegadas vai corresponder ao tempo de ciclo das carregadeiras.

`Ncarusina` deve ser um número maior que 0, mesmo que não vá acontecer a retomada pois através de um módulo `create` sempre tem que sair no mínimo uma entidade, senão ocorre um erro no modelo de simulação. Se não for para ocorrer a retomada , o que vai acontecer é que a entidade ficará retida no próximo módulo `Hold 13`.

A retomada do pátio de britado para alimentar a usina pode ocorrer quando o britador está funcionando com restrição de alimentação por parte da mina e quando o britador está em ,manutenção embora uma das linhas da usina esteja em operação.

“Hold 13”: este módulo faz com que as entidades que vão controlar a retomada do pátio de britado só poderão seguir em frente se realmente uma das condições para a retomada for verificada.

Estas condições são definidas pela expressão, que representa as situações em que pode haver a retomada de acordo com o fluxograma de decisão, ou seja:

```
((nfrentes < 3 && massabrit > metabrit) || (nfrentes < 3 && massabrit <= metabrit && (ncarred == 0 || massa_pulmao <= 0))) || ((STATE(britador) == FAILED_RES || STATE(britador) == INACTIVE_RES)&&( SIT_linha1==0 || SIT_linha2 == 0) ) || ( Tipo de minerio == "bruta" &&( SIT_linha1==0 || SIT_linha2 == 0) ) && massa_patiobritado > 0
```

“Assign define massa da carregadeira e diminui massa da pilha”: diminui-se a massa a ser enviada para a usina da massa presente no pátio de britado “`massa_patiobritado = massa_patiobritado-massacarr`”. O valor deste atributo

“massacrar” é definido neste módulo também e que corresponde à massa da carregadeira que pode ser constante ou seguir uma distribuição de probabilidade.

“Hold moega cheia?”: Através da condição “massa_moegaretomada + massacarr <= capmoeganaretomada”, garante-se que a carregadeira só descarregará na moega da retomada se ela não estiver cheia, ou seja, se ela for capaz de receber a massa da carregadeira.

Embora no pátio de britado exista até 3 moegas que podem alimentar uma correia que conduzirá o material até outro transportador e daí até a usina, foi considerado no modelo somente uma única moega, mas com capacidade equivalente ao total das moegas que seriam utilizadas para receber o material retomado do pátio de britado.

Seize 1: Através deste módulo é alocada uma carregadeira pertencente ao grupo de carregadeiras “set carregadeiras”. A regra para se escolher qual das carregadeiras pertencentes a este set foi *cyclical*, de forma a fazer um rodízio entre elas.

“Process descarrega carregadeira moega retomada”: é considerado um “seize delay e release” para representar a descarga na moega. Serão utilizados o recurso “moega_da_retomada” e a carregadeira alocada no módulo seize. O tempo em minutos gasto na descarga da moega é assumido ser igual ao tempo de ciclo da carregadeira. É usado a opção size – delay – release, para que assim que haja a descarga de uma carregadeira, os recursos carregadeira e moega da retomada possam ser liberados para permitir a descarga de mais carregadeiras. A capacidade de atendimento simultânea do recurso moega da retomada é igual ao número de moegas que serão utilizadas na realidade e que estão sendo substituídas no modelo por uma só.

Release 1: Através deste módulo é liberada a carregadeira que acabou de descarregar na moega da retomada.

“Assign atualiza moega da retomada”: é o módulo que irá adicionar a massa descarregada pela carregadeira na moega “massa_moegaretomada = massa_moegaretomada+massacarr”.

Após este assign a entidade controladora retorna ao hold 13, para verificar novamente se as condições de retomada são satisfeitas.

7º circuito: alimenta pilha usina

O objetivo deste circuito é transferir de forma contínua uma massa discreta de uma tonelada da moega até à usina.

“Create alimenta pilha usina”: entra uma entidade com apenas uma entrada, pois é entidade de controle. Essa entidade chega no instante 0.001, pois todas as entidades controladoras entram no início do circuito para garantir um envio contínuo de material para o equipamento seguinte (mesma condição dos outros).

“Hold 29”: verifica a condição “massa_moegaretomada > 0”, ou seja, se tem massa na moega para envio até a usina.

“Process transfere massa para alimentador”: é definida uma ação “seize delay release”, e definido um recurso “alimentador”. O tempo de transferência é considerado constante com um valor igual a $\text{massaretomada} * 60 / (\text{prodlinhausina} * ((\text{SIT_linha1} == 0) + (\text{SIT_linha2} == 0)))$. O valor de prodlinhausina em t/h corresponde á taxa de uma das linhas de alimentação da usina igual a 570 t/h. O tempo de transferência vai depender do número de linhas da usina que serão abastecidas via pátio de britado. O valor da massa discreta de 1 tonelada a ser transferido é armazenado na variável massaretomada.

“Assign atualiza alimentador e moegaretomada”: Neste assign é atualizada a “massa_moegaretomada = massa_moegaretomada - massaretomada”. A massa do alimentador é definida como “massa_alimentador = massa_alimentador + massa retomada.

“Separate 4 ”: A função deste separate é análoga a outros presentes em circuitos já descritos anteriormente. A entidade original segue em frente enquanto a outra retorna para verificar se o processo de transferência pode ser novamente repetido , simulando desta forma uma operação contínua.

“Process alimenta linha usina através de retomada”: É onde ocorre a alimentação de bauxita britada através de retomada do pátio de britado. É usado um “seize delay release” . O tempo de transferência da massa discreta ,massaretomada, é assumido constante e igual a $\text{massaretomada} * 60 / (\text{prodlinhausina} * ((\text{SIT_linha1} == 0) + (\text{SIT_linha2} == 0)))$. É definido o recurso “usina virtual2”, que irá indicar que a alimentação da usina se fará via retomada do pátio de britado, para diferenciar da alimentação da usina por meio do britador.

“Assign atualiza massa_usina”: Neste assign é atualizada a massa alimentada da usina através da expressão : “massa_usina = massa_usina+massaretomada. A massa presente no alimentador é também atualizada por meio da expressão “massa_alimentador = massa_alimentador –massaretomada. É acumulado também a massa que é alimenta a usina através da retomada do pátio de britado através da expressão massausinapatio = massausinapatio+massaretomada.

Dispose: libera a entidade.

Manutenção Linha 1

Este circuito controla a manutenção da linha 1 da usina.

“Create 7”: é considerada uma chegada por vez, com uma entidade por chegada e entrando apenas uma vez no sistema. A primeira criação será no instante 0.001.

“Decide Manut Linha1 esta ativa?”: este decide tem a função de permitir ao usuário escolher se a parada das linhas para manutenção será considerada no modelo e se no início da simulação será considerado que a linha 1 está ativa ou não.

Se expressão “v_manut_corr == 1 && SIT_linha1 == 0” for verdadeira então a manutenção será considerada e o estado inicial da linha1 estará ativo (SIT_linha1 == 0)

Se a condição é “v_manut_corr == 1 && SIT_linha1 == 1” for verdadeira então a manutenção será considerada e o estado inicial da linha1 será o de manutenção ativo (SIT_linha1 == 1)

Se nenhuma destas condições forem verdadeiras, é porque v_manut é 0, e portanto, a manutenção não será considerada.

“Assign Linha1 disponível”: é definido o valor da variável SIT_linha1 como sendo 0, indicando que a linha 1 está ativa e define-se o tempo MTBFL1 ,em que ela irá permanecer neste estado.

“Delay MTBFL1”: é contabilizado o tempo MTBFL1, indicando que após este módulo a linha 1 entrará em manutenção.

“Assign Linha1 em manut”: é definido o valor da variável SIT_linha1 como sendo 1, indicando que a linha 1 está em manutenção. Define-se também o tempo MTTRL1 ,em que ela irá permanecer neste estado. Outra variável é adicionada “amarca1 = Tnow” para marcar o instante em que a linha entrou em manutenção.

“Delay MTTRL1”: é contabilizado o tempo MTTRL1, indicando que após este módulo a linha 1 entrará em operação.

“Dispose 7”: libera a entidade , no caso de não ser considerada a manutenção das linhas.

A variável `amarca1` será utilizada no modelo para se calcular se em um dado instante o tempo que falta para a linha entrar em operação é maior do que 30 minutos, afim de orientar uma tomada de decisão dentro do modelo.

Manutenção Linha 2

Este circuito controla a manutenção da linha 2 da usina.

“Create 8”: é considerada uma chegada por vez, com uma entidade por chegada e entrando apenas uma vez no sistema. A primeira criação será no instante 0.001.

“Decide Manut Linha2 esta ativa?”: este decide tem a função de permitir ao usuário escolher se a parada das linhas para manutenção será considerada no modelo e se no início da simulação será considerado que a linha 2 está ativa ou não.

Se expressão “`v_manut_corr == 1 && SIT_linha2 == 0`” for verdadeira então a manutenção será considerada e o estado inicial da linha1 estará ativo (`SIT_linha2 == 0`)

Se a condição é “`v_manut_corr == 1 && SIT_linha2 == 1`” for verdadeira então a manutenção será considerada e o estado inicial da linha1 será o de manutenção ativo (`SIT_linha2 == 1`)

Se nenhuma destas condições forem verdadeiras, é porque `v_manut` é 0, e portanto, a manutenção não será considerada.

“Assign Linha2 disponivel”: é definido o valor da variável `SIT_linha2` como sendo 0, indicando que a linha 1 está ativa e define-se o tempo `MTBFL2` ,em que ela irá permanecer neste estado.

“Delay MTBFL2”: é contabilizado o tempo MTBFL2, indicando que após este módulo a linha 1 entrará em manutenção.

“Assign Linha2 em manut”: é definido o valor da variável `SIT_linha2` como sendo 1, indicando que a linha 2 está em manutenção. Define-se também o tempo `MTTRL2` ,em que ela irá permanecer neste estado. Outra variável é adicionada “`amarca2 = Tnow`” para marcar o instante em que a linha entrou em manutenção.

“Delay MTTRL2”: é contabilizado o tempo MTTRL2, indicando que após este módulo a linha 2 entrará em operação.

“Dispose 8”: libera a entidade , no caso de não ser considerada a manutenção das linhas.

A variável `amarca2` será utilizada no modelo para se calcular se em um dado instante o tempo que falta para a linha entrar em operação é maior do que 30 minutos, afim de orientar uma tomada de decisão dentro do modelo.

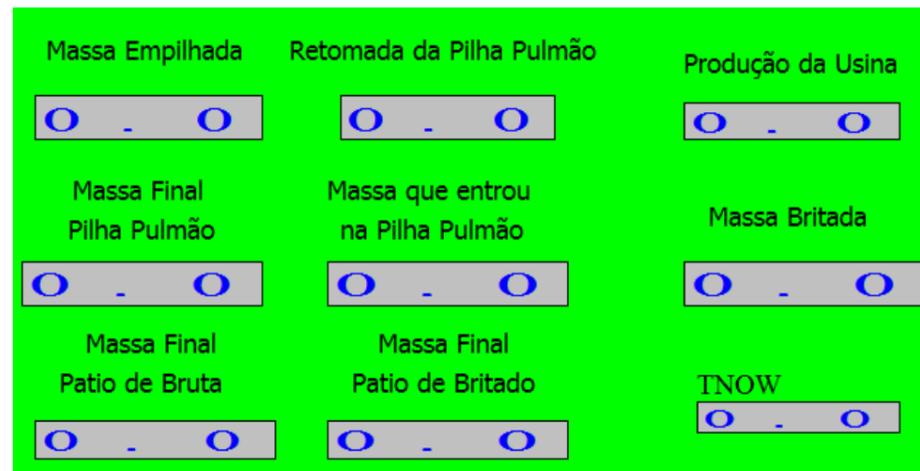
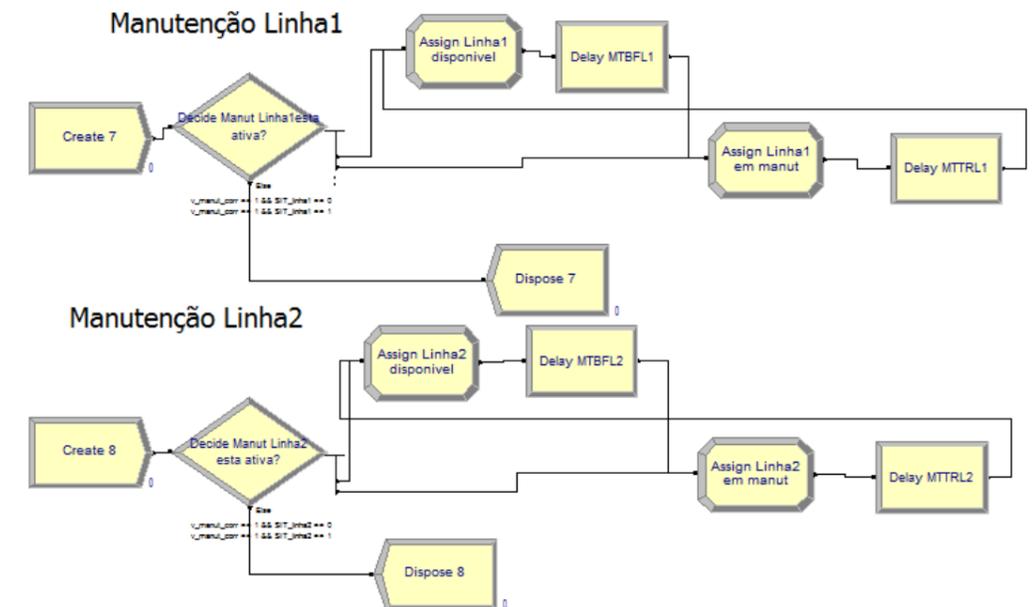
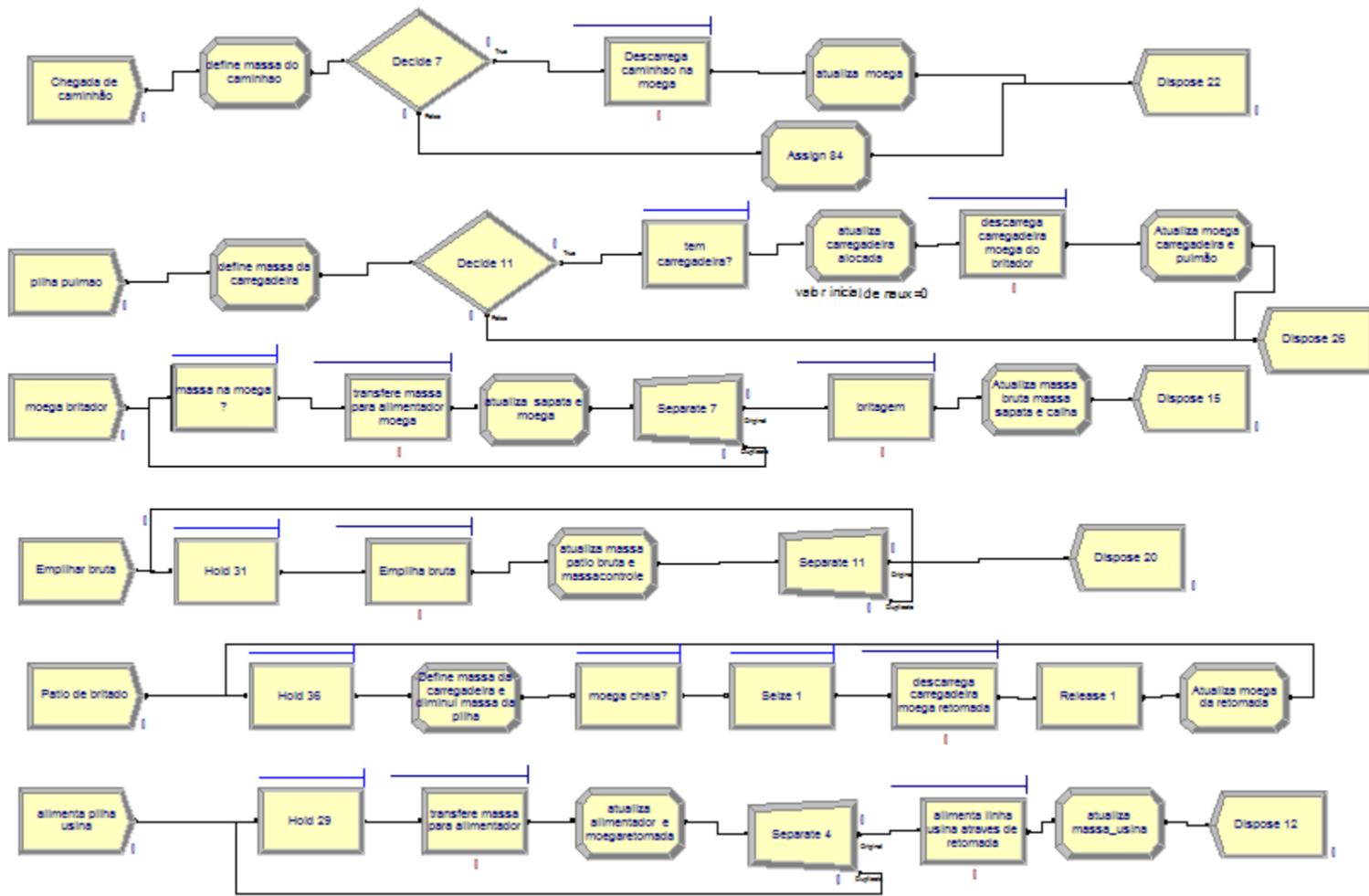


Figura 18: Modelo da britagem do carregamento de bruta (não lavada).

5.2 Modelo da Britagem para Bauxita Bruta

O modelo de britagem de bauxita bruta é semelhante ao de bauxita lavada. A principal diferença é que a bauxita bruta uma vez britada, ela não alimenta a usina, ela já é considerada produto e portanto, ela precisa de ser empilhada e carregada em vagões para ser levada ao porto.

No entanto, enquanto a bauxita bruta está sendo britada e empilhada, pode haver alimentação pelas linhas da usina de bauxita lavada retomada do pátio de britado.

No caso da bruta, a capacidade de produção da britagem é de 1600 t/h. Para se atingir esta meta é necessário que quatro 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.

Se o número de frentes em lavra simultânea, for menor do que duas, não se realiza a britagem.

Na construção do modelo de britagem de bauxita bruta, as situações que influenciam o fluxo de minério levadas em consideração dizem respeito à aderência à meta de britagem, número de frentes de lavras simultâneas, capacidade do pátio de bruta, e disponibilidade de equipamentos tais como britador, empilhadeira e linhas da usina.

Através dessas informações e de dados adquiridos em campo, foi possível construir o modelo de simulação da britagem de bruta, retratado na Figura 18. As variáveis inseridas no modelo se encontram listadas na Tabela 2 nos Apêndices.

As variáveis que devem ser determinadas antes da simulação são: *prodsapata* (produtividade do alimentador de sapatas), *nfrentes* (número de frentes da mina em operação), *ncarusina* (número de carregadeiras que alimentam a usina através de retomada), *prodalimentador* (produtividade da retomada), *v_manut_corr* (manutenção), *ncarred* (número de carregadeiras disponíveis para a retomada pulmão) e *naux* (número de carregadeiras alocadas para realizar a retomada do pulmão).

A tabela 2 que se encontra no Apêndice apresenta o significado dos nomes de variáveis, atributos e distribuições estatísticas utilizadas no modelo de britagem de bauxita bruta.

Para uma melhor descrição do modelo apresentada em sequência subdividiu-se o modelo em uma série de circuitos.

1° circuito: Chegada caminhão

O objetivo desse percurso é promover a descarga dos caminhões que chegam na moega de alimentação do britador. A entidade deste circuito são os caminhões.

“Create chegada de caminhões” define o tempo de chegada das entidades caminhões. Pode-se colocar um valor fixo de intervalos de chegada ou uma distribuição de probabilidade com tempos adquiridos em campo.

“Assign define massa do caminhão” adiciona a cada caminhão o atributo “massacaminhão” que recebe o valor de 37 t, de capacidade dos caminhões Alcoa.

“Decide 7” verifica se as condições para que a descarga na moega são satisfeitas. Estas condições são $massa_moega + massacaminhao \leq capmoega \ \&\& \ STATE(britador) \in \{FAILED_RES, INACTIVE_RES\} \ \&\& \ STATE(empilhadeira) \in \{FAILED_RES\} \ \&\& \ massa_patio\ bruta < cap_pilha_bruta$, ou seja, se a moega, não está cheia, se o britador e a empilhadeira não estão em manutenção e se o pátio de bauxita bruta não está cheio. Se estas condições não são satisfeitas o caminhão vai descarregar na pilha pulmão.

“Process descarrega caminhão na moega no britador” será uma ação “seize delay release” no qual o recurso é a “moega do britador”. Dessa forma, o recurso moega do britador será ocupado, a descarga é efetuada após um certo tempo, e logo após o recurso é liberado. Deve ser adicionado um tempo médio, ou uma distribuição conhecida, em que ocorrem as descargas. Na definição do recurso moega do britador considera-se que até duas entidades entre caminhões ou pá-carregadeiras podem ser descarregados simultaneamente.

“Assign atualiza moega” atualiza o valor de massa da moega através da expressão “ $massa_moega = massa_moega + massacaminhao$ ” após a descarga da massa do caminhão.

“Assign 84” atualiza a massa da pilha pulmão, fazendo $massa_pulmaobruta = massa_pulmaobruta + massacaminhao$. A massa também que entra na pilha pulmão deste o início da simulação também é atualizada através da expressão $massa\ entrapulmaobruta = massa\ entrapulmaobruta + massacaminhao$.

Dispose 22 retira ou libera a entidade do modelo.

2° circuito: Pilha pulmão

O objetivo desse circuito é possibilitar a retomada de massa da pilha pulmão através de pá-carregadeiras e a descarga das mesmas na moega de alimentação do britador.

“Create Pilha pulmão”- Neste módulo é criada a entidade “carpulmao” referente às carregadeiras que retomam material das pilhas pulmão de bauxita lavada. Esta entidade não é a pá-carregadeira, mas é ela que vai alocar uma das pá-carregadeiras para fazer a retomada da pilha pulmão. Adiciona-se um tempo de intervalo que corresponde de quanto em quanto tempo as carregadeiras surgem para a descarga na moega. Então o intervalo de chegada estará ligado ao tempo de ciclo das pá-carregadeiras. Está previsto que a primeira chegada vai ocorrer logo no início da simulação, mesmo que nenhuma carregadeira tenha sido escalada para a retomada da pilha pulmão. Neste caso a entidade entra, mas sai mais à frente.

“Assign define massa da carregadeira”: é definido o atributo “massacar” por meio de uma distribuição de onde será amostrado o valor da massa carregada pela concha da carregadeira. Poderia ser usado também um valor médio constante.

Decide 11 : São definidas as seguintes condições Tipo de minerio == "bruta" &&(nfrentes == 3 || nfrentes == 2) && massabruta <= metabruta && massa_pulmao_bruta > 0 && massa_moega+massacarr <= capmoega && ncarred <> 0 && (STATE(britador) <>FAILED_RES && STATE(britador) <> INACTIVE_RES) && STATE(empilhadeira) <> FAILED_RES && massa_patiobruta < cap_pilha_bruta, para que a descarga possa ser realizada. O tipo de minério é bruta. O número de frentes deve ser igual a 3 ou igual a 2, se igual a 2. Deve ter sido reservada no mínimo uma carregadeira para a retomada da pilha pulmão. O britador e ou empilhadeira não podem estar em manutenção. O pátiode bruta não pode estar cheio. A massa que está passando na britagem ainda não deve ter atingido a meta. E, por último, a pilha pulmão de bruta deve possuir massa.

“Hold tem carregadeira e moega cheia?”: Neste módulo são impostas as condições “naux < ncarred && massa_moega+massacarr <= capmoega para que haja a alocação da pá-carregadeira” pela entidade carpulmao. A primeira é para saber se tem carregadeira disponível para alimentar a moega. Se o número de carregadeira já

alocadas, n_{aux} , é menor que o número total de carregadeiras disponíveis para essa atividade, n_{carred} . Se forem iguais, não tem carregadeira disponível.

“Assign atualiza carregadeira alocada” a variável “ n_{aux} ” será atualizada para “ $n_{aux} = n_{aux} + 1$ ”, o que indica que uma carregadeira será alocada. Este acréscimo deve ser feito antes de se começar a descarga para que durante a mesma se chegar uma nova entidade $carpulmao$ não se corra o risco de tentar alocar mais carregadeiras do que o número reservado para tal tarefa.

“Process descarrega carregadeira moega do britador” será uma ação “seize delay release” no qual o recurso é a “moega do britador”, juntamente com a carregadeira que é alocada neste módulo. Será alocada uma das carregadeiras que foram designadas como o grupo disponível para essa atividade. Essas carregadeiras são as mesmas que exercem as atividades de retomada de bauxita britada no pátio de britado e que realiza o carregamento de vagões. Então, serão separadas de acordo com a operação. Terminada a operação a moega do britador e a carregadeira são liberadas.

“Assign Atualiza moega carregadeira e pulmão”- Neste módulo é atualizada a massa da moega por meio da expressão “ $massa_moega = massa_moega + massacarr$ ”, a massa retirada da pilha através da expressão “ $massa_pulmao_bruta = massa_pulmao_bruta - massacarr$ ” e o número de carregadeiras alocadas por meio da expressão “ $n_{aux} = n_{aux} - 1$ ”, já que agora uma carregadeira foi liberada e a massa que sai da pilha pulmão, através da expressão $massasaidapulmaobruta + massacarar$.

Através do módulo $dispose\ 26$, a entidade $carpulmao$ sai do modelo.

3° circuito: moega britador

O terceiro circuito vai permitir que uma massa da moega passe pelo britador de forma contínua por meio do alimentador de sapata e do britador para uma calha virtual que irá posteriormente alimentar as correias transportadoras $tp611A$.

“Create moega britador”: entra uma entidade por vez, com o máximo de chegada de um. Uma entidade passa pelo create moega britador uma única vez e será responsável para controlar a transferência de forma contínua de sempre 1 tonelada para o alimentador de sapata, depois para o britador e depois para a calha virtual que vai alimentar as primeiras correias. Esta transferência vai se dar de forma contínua desde

que haja no mínimo uma massa de uma tonelada na moega e desde que o britador esteja ativo, condição verificada no hold “massa na moega?”

“Hold massa na moega”- Neste hold são verificadas as condições para que possa haver a transferência da massa de 1 tonelada (valor da massa discreta) para o alimentador de sapata. O valor dessa massa discreta é armazenado na variável massa.

Estas condições são as seguintes:

```
massa_moega >0 && (STATE(britador) <>FAILED_RES && STATE(britador) <> INACTIVE_RES) && massa_patiobruta <cap_pilha_bruta && (Tipo de minerio == "bruta") && nfrentes >= 2 && STATE(empilhadeira) <> FAILED_RES, ou seja, deve haver massa na moega, o britador não deve apresentar falha, o pátio de bruta não deve estar cheio, o número de frentes deve ser no mínimo dois e a empilhadeira não pode estar em manutenção.
```

“Process transfere massa para alimentador moega”: Neste process com uma ação “seize delay release” é feita a transferência da massa discreta de uma tonelada (variável massa) da moega para o alimentador da moega . O tempo de transferência em minutos é calculado através da expressão “60*massa/prodsapata” , onde prodsapata é a produtividade do alimentador de sapata em t/h que corresponde à taxa de britagem. Considerou-se um recurso sapata que fica indisponível durante esta transferência com capacidade igual a 1 , portanto impedindo a entrada de outra massa de 1 tonelada enquanto este recurso não for liberado.

“Assign atualiza sapata e moega”: = Neste assign é atualizada a massa da moega, retirando a massa que passou para o alimentador de sapatas por meio da expressão “massa_moega = massa_moega-massa”. Atualiza-se também a massa do alimentador de sapatas que recebe a massa enviada por meio da expressão “massa_sapata = massa_sapata+massa”.

“Separate”: Neste módulo a entidade controladora é duplicada para que ela que controla o fluxo da massa de uma tonelada vá para o módulo seguinte de britagem, mas que possa também retornar ao módulo Hold “massa na moega?” para executar o mesmo processo com mais uma tonelada e assim por diante. Desta forma é que se dá o processo contínuo.

“Process britagem”: Neste módulo com uma ação “seize delay release” simula a passagem da massa discreta pelos britadores. O tempo de transferência foi admitido como constante e igual também à “ $\text{massa} \cdot 60 / \text{prodsapata}$ ”. O recurso britador é adicionado neste módulo, com uma capacidade igual a 1.

“Assign Atualiza massa bruta e massa sapata e calha”: Neste módulo é atualizada a massa presente no alimentador de sapatas por meio da expressão “ $\text{massa_sapata} = \text{massa_sapata} - \text{massa}$ ” já que uma massa de 1 t saiu do alimentador e foi para o britador, a massa britada, massabruta, que é incrementada do valor da massa (1 tonelada) por meio da expressão $\text{massabruta} = \text{massabruta} + \text{massa}$, e da massa da calha virtual que recebe essa massa de 1t, por meio da expressão: $\text{calha_tp611A} = \text{calha_tp611A} + \text{massa}$. Observa-se que massabruta no início da simulação não necessariamente é zero, pois a simulação pode ter iniciado já com uma massa britada acumulada anteriormente em outro período. Essa massa é utilizada para verificar se ela está aderente à meta. É atualizada também a massa britada, massabritador, que acumula a massa britada desde o início da simulação através da expressão $\text{massabritador} + \text{massa}$. A utilização desta calha virtual foi necessária para permitir a continuação do fluxo contínuo, ou seja, admite-se aqui que assim que a massa discreta de uma tonelada tenha terminado de passar pelo britador ela tenha sido transferida para a correia transportadora tp611A.

“Dispose 26”: libera a entidade.

4º circuito: empilhar bruta

O objetivo deste circuito é direcionar a massa que passa pelo divisor de fluxo para o empilhamento no pátio de britado.

“Create empilhar bruta”: entra uma entidade com apenas uma entrada, pois é entidade de controle. Essa entidade chega no instante 0.001, pois todas as entidades controladoras entram no início do circuito para garantir um envio contínuo de material para o equipamento seguinte (mesma condição dos outros).

“Hold 31”: Neste hold são verificadas as condições para que possa haver a transferência do valor da massa discreta para a empilhadeira e daí para o pátio de bruta.

Estas condições estão presentes na expressão: “calha_tp611A > 0 &&Tipo de minerio =="bruta" “ ou seja, confere se tem material na calha da tp611A , e as demais situações presentes no fluxograma de decisão em que pode ocorrer o empilhamento.

“Process empilha bruta”: é onde ocorre o empilhamento de bauxita bruta, sendo usado um “seize delay release” em que o tempo de empilhamento da massa discreta é fixado pela expressão: “massadiscreta*60/(prodsapata)”. Neste módulo é definido o recurso empilhadeira com capacidade de atendimento igual a 1.

“Assign atualiza massa patio bruta e massacontrole”: Neste módulo é atualizada a massa do pátio de bruta através da expressão “massa_patiobruta = massa_patiobruta+massadiscreta”, a massa que está presente na calha virtual através da expressão “calha_tp611A = calha_tp611A - massadiscreta” pois é retirada a massa discreta que está indo para o pátio de bruta e a massa que está sendo empilhada deste o início da simulação através da expressão massaempilhada bruta = massaempilhada bruta + massa.

“Separate11”: Este módulo duplica a entidade para que a duplicata da entidade controladora corresponde à massadiscreta possa retornar ao módulo Hold 31 e executar o mesmo processo simulando o fluxo contínuo, enquanto a entidade original sai do circuito através do Dispose 20.

5° circuito: pátio de britado

Esse circuito é praticamente o mesmo do 6° circuito para britagem de lavado com apenas uma modificação da condição do Hold36.

Esse circuito possibilita a retirada de massa no pátio de britado e alimentação da moega de retomada, quando o minério do tipo bruta está passando pelo circuito de britagem.

No módulo “Create pátio de britado” serão definidas as entidades que vão controlar a transferência de material da pilha de britado para a moega que vai alimentar a correia que transportará o material até a usina. Será criada uma entidade para cada carregadeira a ser usada na retomada no início da simulação.

O número máximo de chegadas ou de entidades é dado por ncarusina que vai indicar o número de carregadeiras a serem usadas na retomada de material do pátio de

britado . O intervalo entre chegadas vai corresponder ao tempo de ciclo das carregadeiras.

Ncarusina deve ser um número maior que 0, mesmo que não vá acontecer a retomada pois através de um módulo create sempre tem que sair no mínimo uma entidade, senão ocorre um erro no modelo de simulação. Se não for para ocorrer a retomada , o que vai acontecer é que a entidade ficará retida no próximo módulo Hold 13.

A retomada do pátio de britado para alimentar a usina pode ocorrer quando o britador está funcionando com restrição de alimentação por parte da mina e quando o britador está em ,manutenção embora uma das linhas da usina esteja em operação.

“Hold 36”: este módulo faz com que as entidades que vão controlar a retomada do pátio de britado só poderão seguir em frente se realmente uma das condições para a retomada for verificada.

Estas condições são definidas pela seguinte expressão “Tipo de minerio == bruta” && (SIT_linha1 == 0 || SIT_linha2 == 0) && massa_patiobritado > 0” , ou seja, que tenha massa no pátio de britado e que pelo menos uma das linhas da usina esteja funcionando.

“Assign define massa da carregadeira e diminui massa da pilha”: diminui-se a massa a ser enviada para a usina da massa presente no pátio de britado “massa_patiobritado = massa_patiobritado-massacarr”. O valor deste atributo “massacrar” é definido neste módulo também e que corresponde à massa da carregadeira que pode ser constante ou seguir uma distribuição de probabilidade.

“Hold moega cheia?”: Através da condição “massa_moegaretomada + massacarr <= capmoeganaretomada”, garante-se que a carregadeira só descarregará na moega da retomada se ela não estiver cheia, ou seja, se ela for capaz de receber à massa da carregadeira.

Embora no pátio de britado exista até 3 moegas que podem alimentar uma correia que conduzirá o material até outro transportador e daí até a usina, foi considerado no modelo somente uma única moega , mas com capacidade equivalente ao total das moegas que seriam utilizadas para receber o material retomado do pátio de britado.

Seize 1: Através deste módulo é alocada uma carregadeira pertencente ao grupo de carregadeiras “set carregadeiras”. A regra para se escolher qual das carregadeiras pertencentes a este set foi *cyclical*, de forma a fazer um rodizio entre elas.

“Process descarrega carregadeira moega retomada”: é considerado um “seize delay e release” para representar a descarga na moega. Serão utilizados o recurso “moega_da_retomada” e a carregadeira alocada no módulo seize. O tempo em minutos gasto na descarga da moega é assumido ser igual ao tempo de ciclo da carregadeira. È usado a opção size – delay – release, para que assim que haja a descarga de uma carregadeira, os recursos carregadeira e moega da retomada possam ser liberados para permitir a descarga de mais carregadeiras. A capacidade de atendimento simultânea do recurso moega da retomada é igual ao número de moegas que serão utilizadas na realidade e que estão sendo substituídas no modelo por uma só.

Release 1: Através deste módulo é liberada a carregadeira que acabou de descarregar na moega da retomada.

“Assign atualiza moega da retomada”: é o módulo que irá adicionar a massa descarregada pela carregadeira na moega “massa_moegaretomada = massa_moegaretomada+massacarr”.

Após este assign a entidade controladora retorna ao hold 36, para verificar novamente se as condições de retomada são satisfeitas.

6° circuito: alimenta pilha usina

Este circuito é praticamente o mesmo do 6° circuito de britagem de lavado.

O objetivo deste circuito é transferir de forma contínua uma massa discreta de uma tonelada da moega até à usina.

“Create alimenta pilha usina”: entra uma entidade com apenas uma entrada, pois é entidade de controle. Essa entidade chega no instante 0.001, pois todas as entidades controladoras entram no início do circuito para garantir um envio contínuo de material para o equipamento seguinte (mesma condição dos outros).

“Hold 29”: verifica a condição “massa_moegaretomada > 0 &&(SIT_linha1 == 0 || SIT_linha2 == 0) && Tipo de minerio == "bruta"”, ou seja, se tem massa na moega para envio até a usina. Verifica se as linhas estão funcionando e o tipo do minério.

“Process transfere massa para alimentador”: é definida uma ação “seize delay release”, e definido um recurso “alimentador”. O tempo de transferência é considerado

constante com um valor igual a $\text{massaretomada} * 60 / (\text{prodlinhausina} * ((\text{SIT_linha1} == 0) + (\text{SIT_linha2} == 0)))$ ". O valor de prodlinhausina em t/h corresponde á taxa de uma das linhas de alimentação da usina igual a 570 t/h. O tempo de transferência vai depender do número de linhas da usina que serão abastecidas via pátio de britado. O valor da massa discreta de 1 tonelada a ser transferido é armazenado na variável massaretomada .

"Assign atualiza alimentador e moegaretomada ": Neste assign é atualizada a " $\text{massa_moegaretomada} = \text{massa_moegaretomada} - \text{massaretomada}$ ". A massa do alimentador é definida como " $\text{massa_alimentador} = \text{massa_alimentador} + \text{massa_retomada}$ ".

"Separate 4 ": A função deste separate é análoga a outros presentes em circuitos já descritos anteriormente. A entidade original segue em frente enquanto a outra retorna para verificar se o processo de transferência pode ser novamente repetido , simulando desta forma uma operação contínua.

"Process alimenta linha usina através de retomada": É onde ocorre a alimentação de bauxita britada através de retomada do pátio de britado. È usado um "seize delay release" . O tempo de transferência da massa discreta massaretomada , é assumido constante e igual a $\text{massaretomada} * 60 / (\text{prodlinhausina} * ((\text{SIT_linha1} == 0) + (\text{SIT_linha2} == 0)))$ ". É definido o recurso "usina virtual2", que irá indicar que a alimentação da usina se fará via retomada do pátio de britado, para diferenciar da alimentação da usina por meio do britador.

"Assign atualiza massa_usina ": Neste assign é atualizada a massa alimentada da usina através da expressão : " $\text{massa_usina} = \text{massa_usina} + \text{massaretomada}$ ". A massa presente no alimentador é também atualizada por meio da expressão " $\text{massa_alimentador} = \text{massa_alimentador} - \text{massaretomada}$ ".

5.3 Modelo do Carregamento de vagões - bauxita lavada

A construção do modelo foi baseada em dados adquiridos em campo, anteriormente mencionados, e no DCA construído. Os dados de entrada são provenientes do carregamento de vagões do pátio de bauxita lavada. Pode-se verificar o modelo construído na Figura 19.

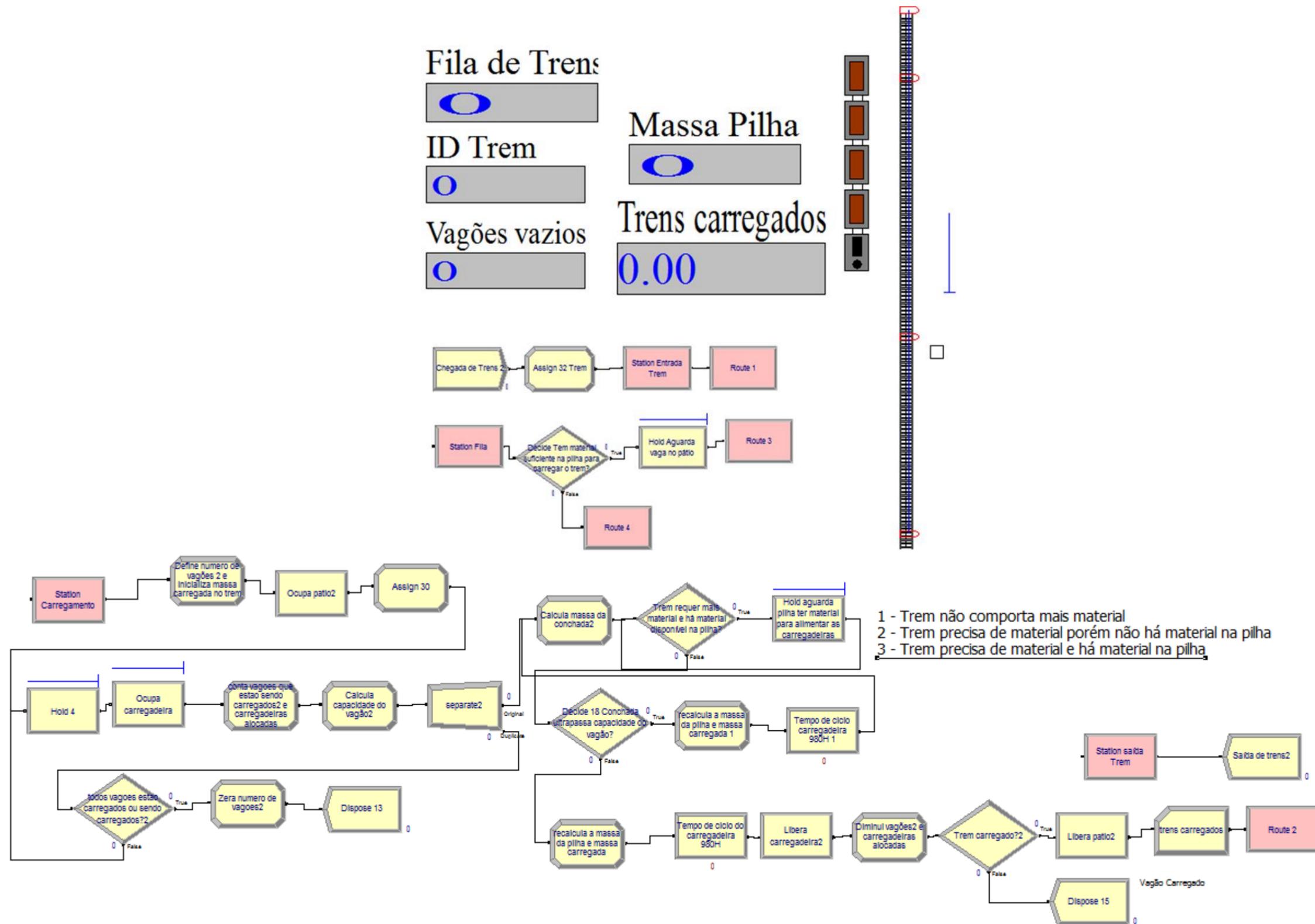


Figura 19: Modelo do carregamento de vagões bauxita lavada.

Para conseguir construir o modelo foi necessário tratar os dados coletados em campo, pois podem conter erros. A forma inicial de coleta foi manual, com o auxílio do cronômetro, e depois foram construídas tabelas e gráficos no Excel. Os dados foram analisados no “Input Analyzer”, ferramenta intrínseca ao programa Arena.

As manutenções estão consideradas nos módulos “Resources” juntamente com os módulos Failures.

A tabela 2 retrata as variáveis inseridas no modelo:

Tabela 2: Dados utilizados na construção do modelo de bauxita lavada.

Tipo	Definição	Valor	Motivo
Atributo	numcarsel		É o número da carregadeira selecionada para carregar um vagão
Atributo	a_capvagao	79.2 + WEIB(2.21, 2.62)	calcula a capacidade do vagão a ser carregado através da distribuição probabilística calculada
Atributo	a_massaconchada	6.32 + 6.68 * BETA(2.54, 1.41)	Massa de conchadas de minério
Atributo	a_massa_vagao	Valor inicial igual a 0	indica a massa que está presente ou que já foi carregada no vagão
Atributo	a_nv	DISC (0.0044, 26, 0.0089, 28, 0.0267, 30, 0.3289, 32, 0.9556, 34, 0.9867, 36, 0.9911, 38, 0.9956, 40, 1.0, 42)	quantidade de vagões que deverão ser carregados
Variável	nvaux		Indica o número de vagões que faltam ser totalmente carregados
Variável	v_nvcar		quantidade de vagões que já foram e ou estão sendo carregados
Variável	v_id_trem	1,2,3...	Indica qual trem está sendo carregado
Atributo	a_cap_vagao	80	Capacidade do vagão
Variável	v_massa_pilha		Fornece o valor atual da massa da pilha
Variável	v_massacarregada		a massa total da pilha que já foi carregada
Variável	contacartrem		contabiliza o número de carregadeiras que estão alocadas realizando o carregamento em um dado momento.
Variável	v_massa_trem		Massa carregada em um trem num dado momento.
Variável	numcartrem		Número disponível de carregadeiras para fazer o carregamento

Variável	v_nv		número total de vagões do trem
----------	------	--	--------------------------------

Coleta de dados

A tabela 3 corresponde às expressões obtidas no Input Analyzer após inserção dos dados adquiridos em campo:

Tabela 3: Dados de campo utilizados na construção das distribuições de probabilidade.

Itens	Distribuição	Expressão	Média	Desvio Padrão	Teste Qui-quadrado	Teste K-S	Nº de dados
Intervalo de chegadas (trens)	EMPIRICAL - CONT	CONT (0.001, 0.001, 0.307, 1.500, 0.428, 3.000, 0.798, 4.500, 0.918, 6.000, 0.946, 7.500, 0.957, 9.000, 0.957, 10.500, 0.965, 12.000, 0.977, 13.500, 0.981, 15.000, 0.988, 16.500, 0.992, 18.000, 0.992, 19.500, 0.996, 21.000, 0.996, 22.500, 0.996, 24.000, 1.000, 24.01)	3.54	3.07	NOK	NOK	257
Número de vagões (trens)	EMPIRICAL - DISC	DISC (0.0044, 26, 0.0089, 28, 0.0267, 30, 0.3289, 32, 0.9556, 34, 0.9867, 36, 0.9911, 38, 0.9956, 40, 1.0, 42)	33,40	1,49	-	-	226
Massa dos vagões	WEIB	79.2 + WEIB(2.21, 2.62)	81.1	0.815	OK	OK	43
Massa das conchadas	BETA	6.32 + 6.68 * BETA(2.54, 1.41)	10.6	1.47	OK	OK	61
Tempo de ciclo (Pá-carregadeiras 980H)	EMPIRICAL - CONT	CONT(0.000, 0.000, 0.000, 0.002, 0.000, 0.004, 0.000, 0.007, 0.003, 0.009, 0.023, 0.011, 0.181, 0.013, 0.584, 0.016, 0.887, 0.018, 0.969, 0.020, 0.992, 0.022, 0.994, 0.024, 0.997, 0.027, 0.997, 0.029, 0.997, 0.031, 0.997, 0.033, 0.997, 0.036, 1.000, 0.038, 1.000, 0.040)	0.0153	0.00243	OK	NOK	353

O termo **NOK** significa que nenhuma das distribuições teóricas disponíveis no ARENA se ajustou aos dados quando se aplicou o teste do Quiquadrado ou K-S.

Intervalos de chegada

A distribuição obtida para a chegada de trens no pátio de bauxita lavada foi a Empírica, utilizando de 257 dados fornecidos. Uma vez que nas outras distribuições o valor de P-value não foi adequado aos testes do Chi-quadrado e K-S, optou-se utilizar a Empírica que equivale a considerar o histograma acumulado crescente dos dados como base para se fazer as amostragens aleatórias. Na Figura 20, pode-se analisar como os dados comportam:

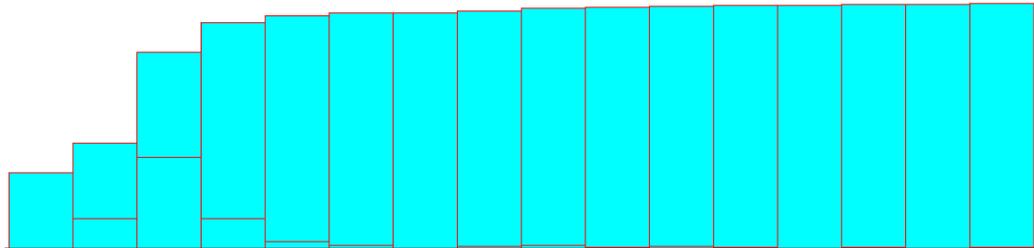


Figura 20: Distribuição Empírica para intervalos de chegadas de trens.

A expressão empírica pode ser CONT ou DISC, ou seja, se referindo a variável contínua ou discreta. Como se trata de valores de tempo, a opção escolhida é CONT.

Número de Vagões

Para obter uma aproximação maior da quantidade de vagões em cada trem que chega ao pátio de lavado, com um número de dados igual a 296, desenvolveu-se uma curva de partição (histograma acumulado crescente) para que fosse construída uma distribuição teórica de probabilidade discreta, uma vez que se trata de valores inteiros, e pudesse ser utilizada no número de vagões do módulo 'Assign'. Pode-se analisar os valores utilizados para a distribuição na Figura 21 abaixo:

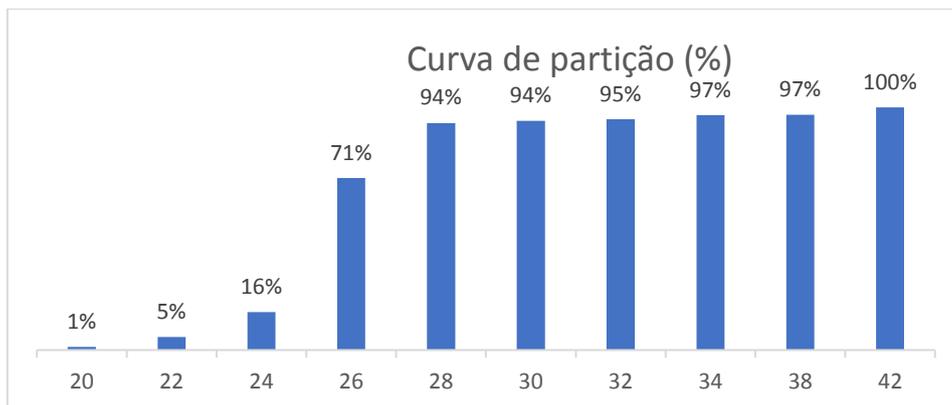


Figura 21: Curva de repartição representando a quantidade de vagões presentes nos trens.

Massa por conchada

Foram coletadas as massas por conchada de cada ciclo da carregadeira, uma vez que a cada conchada é completado 1 ciclo de carregamento. Com essas massas, foi

possível obter uma distribuição BETA que passou nos dois testes, do Chi-quadrado e do K-S. A distribuição é a demonstrada na Figura 22.

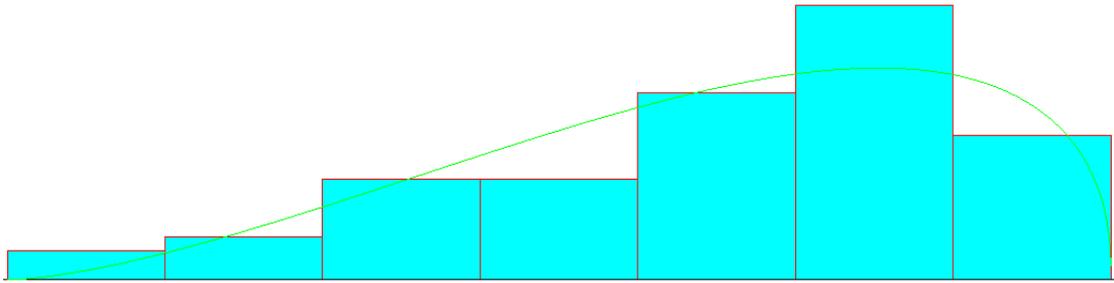


Figura 22: Distribuição de massa por conchada.

Massa dos vagões

Foram coletadas as massas de cada vagão, carregadas pelas pá-carregadeiras. Com essas massas, foi possível obter uma distribuição WEIBULL que passou nos dois testes, do Chi-quadrado e do K-S. A distribuição é a demonstrada na Figura 23.

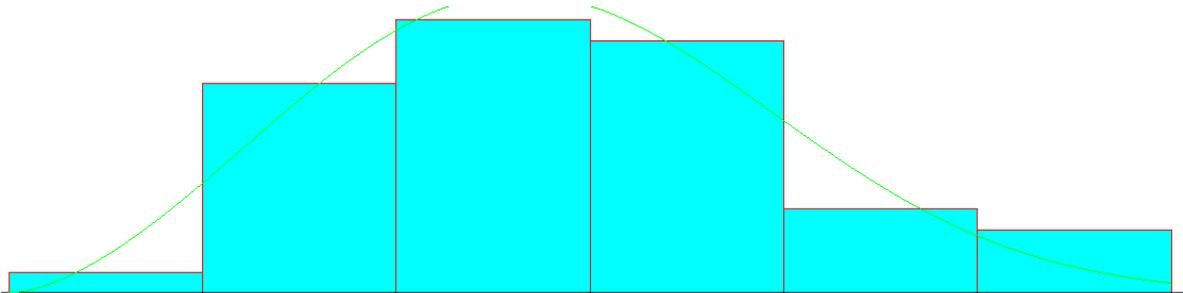


Figura 23: Distribuição de massa dos vagões.

Tempo de ciclo das carregadeiras

A distribuição obtida para o tempo de ciclo das carregadeiras no pátio de bauxita lavada foi a Empírica, utilizando de 353 dados fornecidos. Uma vez que nas outras distribuições o valor de P-value não foi adequado aos testes do Chi-quadrado e K-S,.

Na figura 24 pode-se analisar o comportamento dos dados:

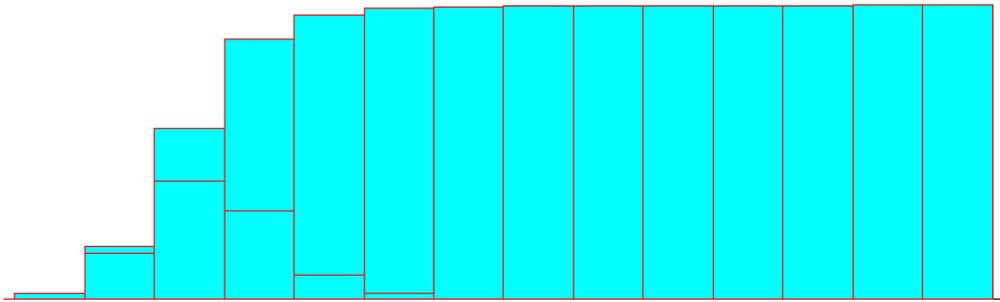


Figura 24: Distribuição de tempo de ciclo das pás carregadeiras.

O número de pontos de dados foi 353, ou seja, é um número considerável de amostras uma vez que deve-se ter no mínimo 30 valores para que seja representativo.

Modelo de Simulação do carregamento de vagões para bauxita lavada

O modelo de simulação é iniciado com a criação de entidades trens no módulo *create* “Chegada de trens”. Uma distribuição é calculada para os valores de intervalos de chegadas de trens que chegam no pátio de lavado, considerando infinitas chegadas.

O *assign 32 Trem* associa a figura de um trem à entidade trem com finalidade de animação do modelo.

Neste modelo foram usados vários módulos do tipo Stations e Routes. A utilização destes módulos permite construir modelos mais organizados em que o número de linhas ligando diferentes módulos é menor, não sobrecarregando tanto o modelo e permitindo com isso um melhor entendimento do mesmo. Uma outra grande vantagem destes módulos é que eles permitem um acesso maior a recursos de animação.

As entidades entram em uma estação, podem ou não realizar uma série de atividades nesta estação de trabalho e depois é transferida para uma outra estação. Neste modelo a transferência de uma estação para outra é feita pelos módulos routes.

No módulo Station simplesmente é definido o nome da estação na qual a entidade entrou ou ocupou. O módulo Station informa então ao Arena o nome da estação na qual a entidade entrou.

Neste modelo a entidade Trem entra na estação “EntradaTrem”, é transferida para a Estação “Fila” através do módulo “Route 1”. Em seguida é transferida para a estação “Carregamento” por meio do módulo “Route 3”, e finalmente é transferida para a estação “Saída de Trem” por meio do módulo “Route 2”. Depois que a entidade entra na estação “Saída de Trem”, ela sai do modelo através do módulo Dispose “Saida de Trem 2”.

A definição de um tempo de transferência nos módulos do tipo Route permite que se veja na animação do modelo a entidade se deslocando de uma estação para outra.

Logo após o Assign 32, a entidade Trem entra na estação “EntradaTrem” e depois vai para a Estação “Fila”.

É utilizado um “Decide Tem material suficiente na pilha para carregar o trem?”, condição na qual avalia que a pilha tenha mais que 240 t e a quantidade de trens na fila seja menor que quatro para admitir a possibilidade de o trem poder ser carregado mesmo que esteja esperando em fila. Se por acaso, a massa das pilhas acabarem trens adicionais que forem chegando após a fila ser de 4, sairão do modelo. É uma situação que normalmente não ocorre, mas se ocorrer pode indicar que algo estranho como por exemplo, a entrada de algum tipo de distribuição ou outro tipo de dado com que se alimenta os módulos podem não estar corretos. Dessa forma evita-se a formação de uma fila muito grande.

O módulo “Hold Aguarda vaga no pátio” proporciona que a entidade espere até que possa ocupar o pátio. Essa garantia é estabelecida através da condição: “NQ(Ocupa patio2.Queue)==0”, inserida neste módulo que simplesmente verifica se a “Fila Ocupa patio2” não possui trens alocados.

Como mencionado, através do módulo “Route 3” a entidade Trem é enviada para a “Station carregamento”, na qual o trem será carregado a partir de algumas condições mostradas nos módulos seguintes. No “Route 4” o trem é direcionado para a estação de saída do trem.

Define-se através de um módulo “Assign define o número de vagões e inicializa-massa carregada no trem” que o trem possui uma certa quantidade de vagões que deverão ser carregados. Este valor é armazenado no atributo ‘v_nv’. Este valor pode ser uma distribuição ou um valor constante. É definida também uma variável com valor inicial igual a zero para armazenar a massa que está sendo carregada em cada trem.

No módulo “Seize ocupa pátio 2” a entidade ocupa o recurso “patedecarregamento”, ou seja, o trem entra no pátio para ser carregado. O “patedecarregamento” foi adicionado ao módulo ‘Resource’. Este recurso só será liberado após o completo carregamento dos trens.

No *assign 30* é inserida a variável v_nvaux que é uma variável auxiliar para preservar o valor original do número de vagões armazenado no atributo ‘v_nv’. O valor desta variável vai indicar quantos vagões ainda faltam para serem totalmente

carregados. Neste módulo também é definida a variável ‘v_id_trem’ que vai indicar qual trem (1, 2, 3, ...) está sendo carregado. O seu valor é calculado como ‘v_id_trem+1’, ou seja, a cada trem que começa a ser carregado o seu valor é incrementado de uma unidade. Durante a execução do modelo uma animação vai mostrando qual o trem está sendo carregado através desta variável.

Em seguida a entidade trem vai para um módulo “Hold 4” no qual a entidade aguarda até que tenha uma carregadeira disponível para começar a carregar um vagão. Cada vagão é carregado por uma carregadeira. O número de carregadeiras disponibilizadas para o carregamento de vagões é fornecido pelo valor da variável “numcartrem” definido antes de se iniciar a simulação. Uma variável “contacartrem” vai contabilizando o número de carregadeiras que estão em um dado momento efetuando o carregamento de vagões. A condição verificada então neste módulo é se $\text{contacartrem} < \text{numcartrem}$, para definir se há carregadeiras ainda disponíveis para serem alocadas para o carregamento de vagões vazios.

O módulo “Seize” é adicionado para que sejam alocadas carregadeiras para carregamento do trem. No módulo “Resource” foi informado um ‘set’ ou seja, um conjunto de recursos formado pelo número de carregadeiras disponível na mina para realizar diferentes atividades. Cada uma destas, desde que não ultrapasse o valor “numcartrem”, será alocada a um vagão de cada vez, até que o mesmo seja completamente preenchido. Depois, a carregadeira poderá ser alocada a outro vagão, depois de ser liberada. É salvo o atributo, ‘numcarse1’ para que se saiba exatamente qual carregadeira que está sendo usada para carregar um determinado vagão e de forma que quando o vagão estiver totalmente carregado, seja liberada a carregadeira que estava fazendo o carregamento daquele vagão. A seleção é feita de forma cíclica de maneira que todas as carregadeiras utilizadas tenham a mesma taxa de utilização.

No módulo “Assign conta vagões que estão sendo carregados 2 e carregadeiras alocadas” seguinte é incrementado de uma unidade a quantidade de vagões que já foram e ou estão sendo carregados “v_nvcar” e o número de carregadeiras alocadas “contacartrem”.

No “Assign calcula capacidade do vagão2” é calculada a capacidade do vagão a ser carregado através da distribuição probabilística calculada. Este valor é salvo no atributo, “a_capvagao”, que acompanha a entidade trem. Neste módulo também é definido um atributo a_massa_vagao com um valor inicial 0 que vai indicar a massa que está presente ou que já foi carregada no vagão.

Uma vez que o trem aloca uma carregadeira para fazer o carregamento de um vagão, é necessário que esta entidade retorne ao “Hold 4” para que um outro vagão possa alocar outra carregadeira para poder ser carregado também. Este ciclo repete-se até que não tenha mais nenhum vagão para ser carregado. Torna-se necessário duplicar esta entidade trem através do módulo “Separate 2”.

A entidade original segue então o fluxo do modelo para que os vagões sejam carregados, e a duplicata retorna ao módulo “Hold 4”. A duplicata só deve retornar ao módulo “Hold 4” se houver ainda vagão para ser carregado. Portanto, a duplicata passa por um módulo “Decide todos vagões estão carregados ou sendo carregados?2” para conferir se não existem mais vagões para serem carregados, analisando-se o número de vagões. Compara-se então se o número de vagões que já foram e ou estão sendo carregados (v_nvcar) é igual ao número total de vagões do trem (v_nv). Em caso positivo, o próximo módulo “Assign zera o número de vagões” fazendo “ $v_nvcar==0$ ” e a entidade duplicada sai do modelo através do módulo “Dispose13”. No caso negativo, a entidade trem duplicada volta para o módulo “Hold 4” anterior para que carregadeiras sejam alocadas aos vagões que faltam para serem carregados.

Por sua vez, a entidade trem original entra no módulo ‘Assign calcula massa da conchada 2’ no qual vai ser calculada a massa que a carregadeira vai transportar na sua concha até o vagão amostrando-se aleatoriamente sobre a distribuição de probabilidade já definida anteriormente. Este valor é armazenado no atributo $a_massaconchada$. Adiciona-se um outro atributo que é $a_massa_vagao = a_massa_vagao + a_massaconchada$, para somar a massa que será carregada à massa que já está presente no vagão. É inserida também uma variável $v_massacarregada = v_massacarregada + a_massaconchada$ para atualizar a massa total da pilha que já foi carregada nos diversos trens que passaram pelo modelo desde o início da simulação.

Como a massa da conchada é calculada antes da carregadeira descarregar esta massa no vagão, é preciso verificar se existe tal massa na pilha. Isto é feito no módulo ‘Decide Trem requer mais material e há material disponível na pilha?’ onde se verifica a condição: ‘ $v_massa_pilha < a_massaconchada$ ’ é verdadeira ou falsa. Se for verdadeira, a entidade é direcionada ao próximo “Hold aguarda pilha ter material para alimentar as carregadeiras” para aguardar na fila até que seja satisfeita a condição ‘ $(v_massa_pilha \geq 10 * a_massaconchada)$ ’, ou seja, quando houver material na pilha suficiente para carregar pelo menos 10 vezes a massa da conchada. Essa condição irá propor que a massa na pilha não seja negativa, ou seja, não falte material na pilha.

Quando isto acontecer a entidade retorna ao módulo ‘Decide Trem requer mais material e há material disponível na pilha?’ para que seja possível realizar o carregamento do vagão.

Caso , ‘ $v_massa_pilha \geq a_massaconchada$ ’, a entidade chega ao “Decide 18 Conchada ultrapassa capacidade do vagão?” para verificar se com a massa da concha calculada não vai ser ultrapassada a capacidade do vagão. É então verificada a condição ‘ $a_capvagao \geq a_massa_vagao + a_massaconchada$ ’. Essa condição verifica se a capacidade do vagão é maior ou igual a soma da massa presente no vagão com a massa da conchada.

Se esta condição for verdadeira, a entidade passa por um módulo ‘Assign Recalcula a massa da pilha e massa carregada 1’ onde são atualizadas a massa carregada no trem, por meio de ‘ $v_massa_trem = v_massa_trem + a_massaconchada$ ’, a massa carregada no vagão por meio de ‘ $a_massa_vagao = a_massa_vagao + a_massaconchada$ ’, a massa total já carregada da pilha por meio de ‘ $v_massacarregada = massacarregada + a_massaconchada$ ’ e a massa restante da pilha através de ‘ $v_massa_pilha = v_massa_pilha - a_massaconchada$ ’.

Logo, a entidade é direcionada ao módulo “Process Tempo de ciclo do carregadeira 980H 1” no qual ocorrerá o gasto de tempo para o carregamento de uma conchada ao vagão. Nesse módulo, foi inserida uma distribuição de probabilidade calculada através de valores de tempos de ciclo da pá-carregadeira 980 H, equipamento utilizado no carregamento de vagões. O tipo de ação neste módulo é “Delay”, ou seja nenhum recurso adicional além da carregadeira já alocada será necessário e após o carregamento do vagão não necessariamente a carregadeira precisa de ser liberada a não ser se o vagão ficar com a sua carga completa. Depois deste “Process” a entidade retorna ao módulo “Assign Calcula massa da conchada 2” onde uma nova massa da concha é calculada para se continuar com o carregamento do vagão.

Caso no *decide 18* a condição ‘ $a_capvagao \geq a_massa_vagao + a_massaconchada$ ’ seja falsa, a entidade é direcionada para um outro módulo “Assign recalcula a massa da pilha e massa carregada” onde inicialmente é redefinida o valor do atributo $a_massa_conchada$ para o novo valor igual $a_capvagao - a_massa_vagao$ e posteriormente são atualizadas a massa carregada no trem, por meio de ‘ $v_massa_trem = v_massa_trem + a_massaconchada$ ’, a massa total já carregada da pilha por meio de ‘ $v_massacarregada = massacarregada + a_massaconchada$ ’ e a massa restante da pilha através de ‘ $v_massa_pilha = v_massa_pilha - a_massaconchada$ ’.

O módulo “Process Tempo de ciclo do carregadeira 980H” exatamente igual ao anterior no qual ocorrerá o carregamento de uma conchada (de massa que falta) ao vagão.

Quando o vagão é totalmente carregado, a entidade segue para o módulo “Release Libera carregadeira 2” onde a carregadeira que estava carregando o vagão é liberada.

Em seguida, a entidade vai para o “Assign Diminui vagões 2 e carregadeiras alocadas” onde se atualiza a variável ‘nvaux’, ou seja, diminui-se o número de vagões que faltam ser totalmente carregados, fazendo-se “ $nvaux = nvaux - 1$ ”. Neste módulo diminui-se também de uma unidade o valor da variável “contacartrem = contacartrem-1”, já que a carregadeira foi liberada pois terminou de carregar totalmente um vagão. Neste módulo, é atribuído também uma nova imagem para a entidade significando que ela vai sair do sistema.

Em seguida à entidade passa no módulo “Decide trem carregado?2” para conferir se todos os vagões foram carregados através da condição ‘ $nvaux == 0$ ’. Se for falsa a condição, a entidade é liberada no “Dispose 15”.

Se for positivo, segue para o próximo módulo “Release Libera pátio 2” para liberar o recurso “patiodecarregamento2”.

No módulo “Record Trens carregados” serão contabilizados o número de trens carregados junto com a massa total carregada nos trens.

O ‘route 2’ direciona o trem para a estação de saída do trem e mostra a saída através de animação.

Por fim, a entidade chega à estação de saída do trem “Station Saída trem” e é liberada no módulo “Dispose Saída de trens2”.

Neste modelo foi levado em consideração as paradas de manutenção das carregadeiras através dos módulos resources e failures.

5.4 Modelo do Carregamento de vagões - bauxita bruta

O Diagrama de Ciclo de Atividades DCA do carregamento de bruta é o mesmo para o de bauxita lavada, como já foi representado anteriormente. A construção do modelo de simulação também será idêntica, Figura 25, modificando apenas os dados adquiridos em campo, que serão detalhados a seguir, e portanto, o modelo não será descrito como no caso da bauxita lavada.

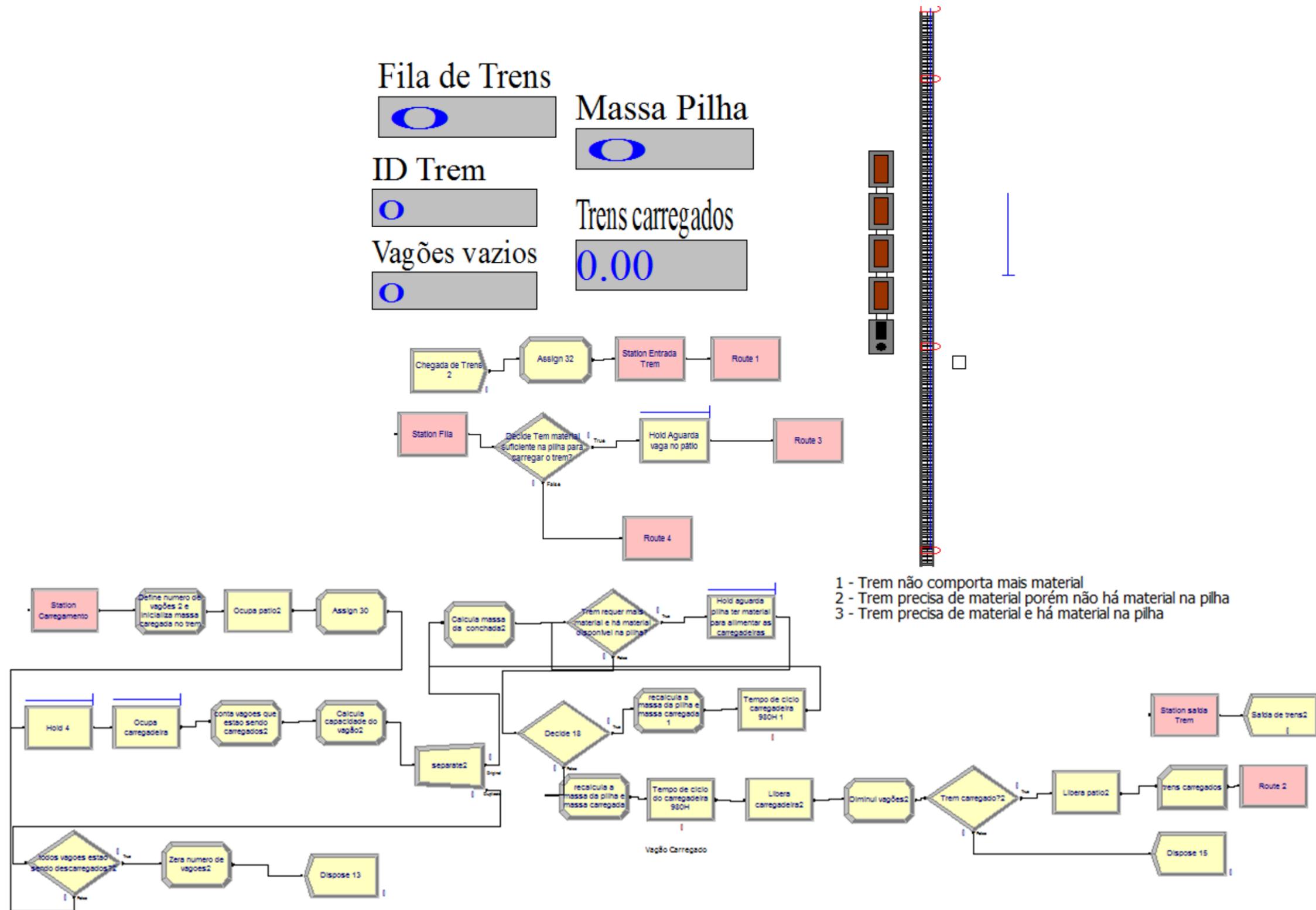


Figura 25: Modelo do carregamento de bauxita bruta.

A tabela 4 mostra as variáveis inseridas para construção do modelo:

Tabela 4: Dados utilizados na construção do modelo de bauxita bruta.

Tipo	Definição	Valor	Motivo
Atributo	numcarsel		É o número da carregadeira selecionada para carregar um vagão
Atributo	a_capvagao	82.66	calcula a capacidade do vagão a ser carregado através da distribuição probabilística calculada
Atributo	a_massaconchada	6.32 + 6.68 * BETA(2.54, 1.41)	Massa de conchadas de minério
Atributo	a_massa_vagao	0	indica a massa que está presente ou que já foi carregada no vagão
Atributo	a_nv	DISC(0.0028, 22, 0.0425, 24, 0.051, 26, 0.1161, 28, 0.2096, 30, 0.5184, 32, 0.9717, 34, 0.9915, 36, 0.9972, 38, 1.0, 66)	certa quantidade de vagões que deverão ser carregados
Variável	massaconchada		Massa de conchadas
Variável	nvaux		diminui o número de vagões que faltam ser totalmente carregados
Variável	massapilha	120.000	Massa inicial da pilha que irá carregar os trens
Variável	massacarregada		Massa já carregada
Variável	v_nvcar		quantidade de vagões que já foram e ou estão sendo carregados
Variável	v_id_trem	1,2,3...	Indica qual trem está sendo carregado
Variável	v_cap_vagao	80	Capacidade do vagão
Variável	v_massa_pilha		verifica se existe massa na pilha para que a carregadeira
Variável	v_massacarregada		atualizar a massa total da pilha
Variável	contacartrem		contabiliza o número de carregadeiras que estão em um dado momento efetuando o carregamento
Variável	numcartrem		número de carregadeiras disponibilizadas para o carregamento
Variável	v_massa_trem		
Variável	v_nv		número total de vagões do trem

Coleta de dados

A tabela 5 corresponde às expressões obtidas no Input Analyzer após inserção dos dados adquiridos em campo:

Tabela 5: Dados obtidos para alimentação do modelo de bauxita britada.

Itens	Distribuição	Expressão	Média	Desvio Padrão	Teste Qui-quadrado	Teste K-S	Nº de dados
Intervalo de chegadas (trens)	LOGN	WEIB(27.3, 0.584)	44.9	77.4	-	OK	19
Número de vagões (trens)	EMPIRICAL - DISC	DISC(0.0028, 22, 0.0425, 24, 0.051, 26, 0.1161, 28, 0.2096, 30, 0.5184, 32, 0.9717, 34, 0.9915, 36, 0.9972, 38, 1.0, 66)	32.21	2.57	-	-	351
Massa dos vagões	-	-	82.66	-	-	-	8
Massa das conchadas	BETA	7.31 + WEIB(4.36, 3)	11.2	1.43	OK	OK	59
Tempo de ciclo (Pá-carregadeiras 980H)	WEIBULL	WEIB(0.000758, 5.17)	0.0007	0.000143	NOK	OK	50

O termo **NOK** significa que nenhuma das distribuições teóricas disponíveis no ARENA se ajustou aos dados quando se aplicou o teste do Quiquadrado ou K-S.

Intervalos de chegada

A distribuição obtida para a chegada de trens no pátio de bauxita bruta foi a EMPÍRICA. Uma vez que nas outras distribuições o valor de P-value não foi adequado aos testes do Chi-quadrado e K-S, optou-se utilizar a Empírica para obter uma aproximação mais próxima do real. Na Figura 26, pode-se analisar como os dados comportam:

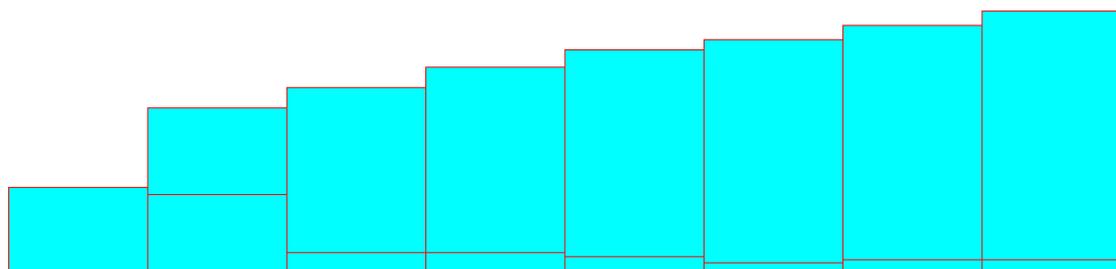


Figura 26: Distribuição Empírica para intervalos de chegadas de trens.

Número de Vagões

Para obter uma aproximação maior da quantidade de vagões em cada trem que chega ao pátio de lavado, desenvolveu-se uma curva de partição para que fosse construída uma distribuição teórica de probabilidade discreta, uma vez que se trata de valores inteiros, e pudesse ser utilizada no número de vagões do módulo 'Assign'. Pode-se analisar os valores utilizados para a distribuição na Figura 27 abaixo:

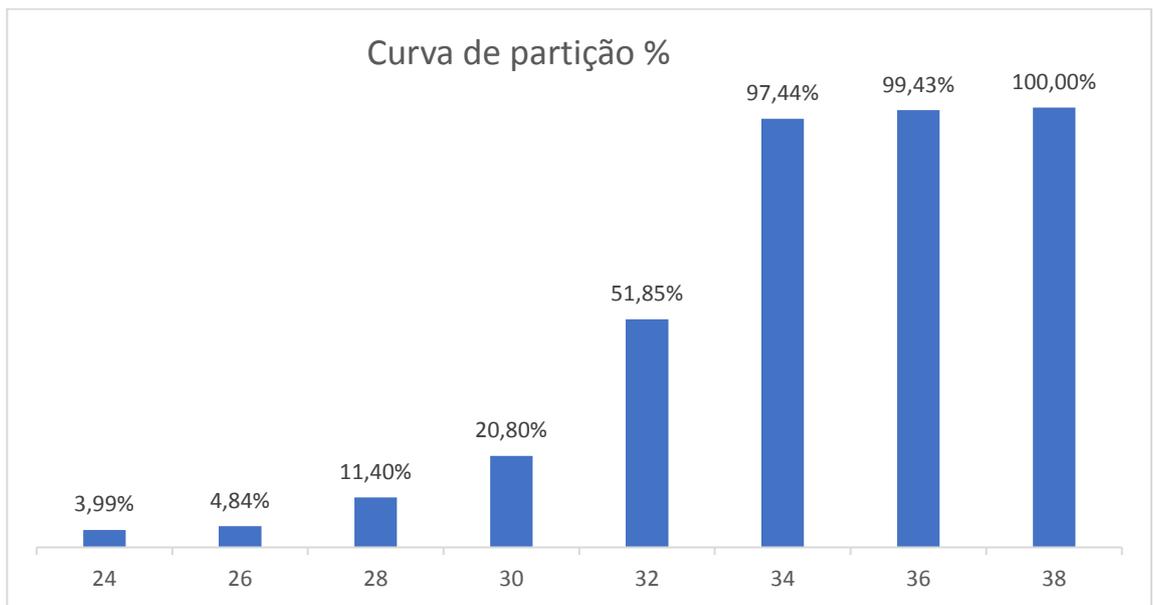


Figura 27: Curva de repartição representando a quantidade de vagões presentes nos trens.

Massas por conchada

Foram coletadas as massas por conchada de cada ciclo da carregadeira, uma vez que a cada conchada é completado um ciclo de carregamento. Com essas massas, foi possível obter uma distribuição WEIBULL que passou nos dois testes, do Chi-quadrado e do K-S. A distribuição é a demonstrada na Figura 28.

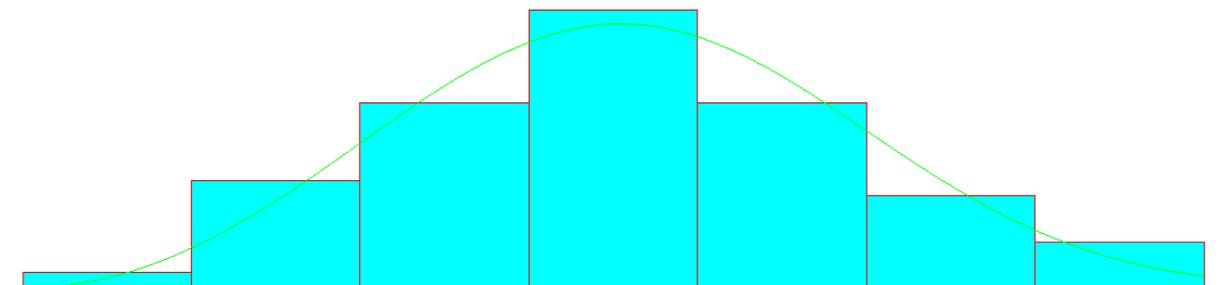


Figura 28: Distribuição de massa por conchada.

Massa dos vagões

Foram coletadas as massas de cada vagão, que são preenchidos pelas pá-carregadeiras. Com essas massas, foi possível obter uma média para ser considerada no modelo.

Tempo de ciclo

A distribuição obtida o carregamento de trens no pátio de bauxita bruta foi a WEIBULL. Na figura 29 pode-se analisar como os dados comportam:

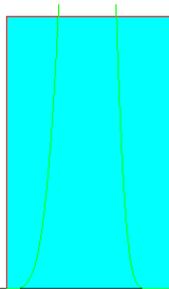


Figura 29: Curva de repartição representando o tempo de ciclo das pá-carregadeiras.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Construídos os modelos a próxima etapa é a verificação de erros e validação antes de os utilizarmos na prática para fazer previsões de comportamentos de um ou mais cenários.

Quando se manda checar o modelo construído, o próprio programa ARENA consegue identificar certos tipos de erros antes mesmo de tentarmos rodar ou executar o modelo. Outros tipos de erros são detectados pelo próprio Arena ao se mandar executar, como por exemplo, a possibilidade de não se passar nenhuma entidade através de um módulo create, ou divisão por zero.

Sendo possível executar o modelo, outros tipos de erros podem ocorrer como por exemplo, um inesperado tamanho de fila muito grande, que pode ser devido a erro de entrada de distribuição em algum módulo do programa ou à uma entrada errada de uma unidade de tempo, erros que são relativamente fáceis de serem consertados.

Não havendo a princípio erros no programa passamos à etapa de validação dos modelos. Esta etapa pode ser feita de duas formas.

Se o modelo puder ser utilizado para se tentar 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 poderia ser carregados com essas informações, ser colocado para rodar e os resultados poderiam ser comparados com aqueles já registrados.

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

Nesses casos devemos 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 exercem influência na produtividade de uma dada operação, deveria haver um acréscimo na produtividade. Outro exemplo, é no caso de uma mina que está operando com sistema de alocação estática de caminhões e queremos testar um sistema

de alocação dinâmica de caminhões às frentes de lavra. No caso da alocação dinâmica, é de se esperar que a produtividade aumente, que a taxa de utilização de certos equipamentos aumente, de que haja diminuição de tempo de espera e tamanho de filas.

Em qualquer situação em que o modelo apresente resultados estranhos, ele não deveria ser validado e portanto teria-se que fazer uma revisão do mesmo para descobrir o que pode estar causando resultados incoerentes. A identificação destes problemas, já é mais difícil. Às vezes a lógica e programação do modelo está correta, mas o problema pode ser conceitual como por exemplo, alguma consideração ou premissa que não foi incluída no modelo, alguma simplificação adotada e que não deveria ter sido feita. Muitas vezes, é necessário retornarmos às primeiras etapas de um estudo de simulação que é a definição do problema e identificação das variáveis ou fatores mais relevantes dos quais o comportamento do sistema depende.

Outras vezes o erro pode ser descoberto procurando rodar o modelo passo a passo, ou introduzir pontos de parada na execução do modelo, onde podemos acessar os valores de uma série de valores de variáveis, atributos, tamanho de filas, etc.

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

Para validar este modelo foram utilizadas 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.

Foram realizadas 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 6, mostra o valor mínimo, máximo, médio e intervalo de confiança ao nível de confiança de 95% obtido para as variáveis massa em toneladas carregada nos trens e número de trens carregados.

Tabela 6: Valores obtidos através dos resultados do modelo de carregamento de bauxita bruta.

variável	média	IC (95%)	mínimo	máximo
Massa carregada nos trens (em t)	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 ntrens foi de 45.100 t. Ambos os valores se encontram dentro do intervalo de confiança de 95%.

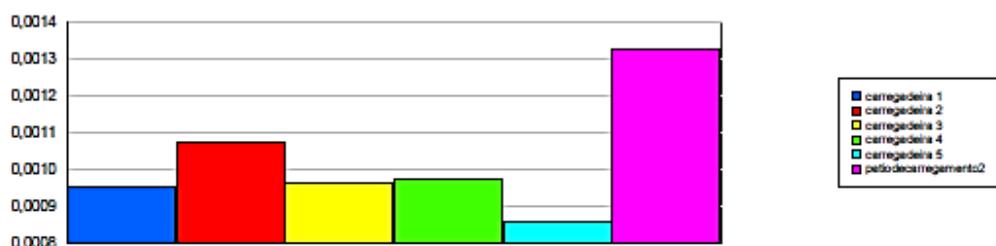
Na tabela 7 é apresentada a taxa de utilização dos recursos carregadeiras e o número de vezes que estes recursos foram ocupados.

Tabela 7: Valores de utilização e número de vezes em que os recursos foram ocupados do modelo de carregamento de bauxita bruta.

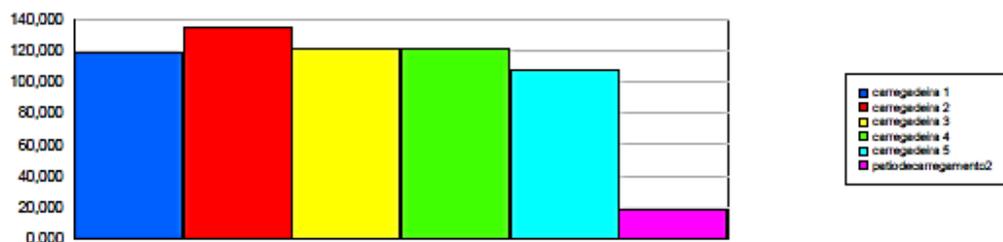
Resource

Usage

Scheduled Utilization	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
carregadeira 1	0.00095033	0,00	0.00028789	0.00163951
carregadeira 2	0.00107572	0,00	0.00046820	0.00218545
carregadeira 3	0.00096479	0,00	0.00046796	0.00207945
carregadeira 4	0.00097246	0,00	0.00045272	0.00211654
carregadeira 5	0.00085851	0,00	0.00035536	0.00198215
patiodecarregamento2	0.00132895	0,00	0.00055065	0.00260221



Total Number Seized	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
carregadeira 1	118.80	18,17	36.0000	205.00
carregadeira 2	134.50	21,34	59.0000	270.00
carregadeira 3	120.63	18,88	59.0000	261.00
carregadeira 4	121.40	19,25	57.0000	266.00
carregadeira 5	107.13	16,41	45.0000	248.00
patiodecarregamento2	18.6333	2,86	8.0000	39.0000



Pode-se observar 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. Baixo 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 baixa reflete o fato de que a demanda de bauxita bruta é pequena, portanto, o intervalo entre chegada de trens é grande, ou seja, praticamente não há formação de fila no pátio de carregamento, pois quando um trem chega o anterior já foi totalmente carregado 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.

6.2 Validação do Modelo do carregamento de vagões de bauxita Lavada.

Para validar este modelo foram utilizadas informações referentes ao processo de carregamento de vagões de trens de bauxita lavada 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.

Foram realizadas 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 8 mostra o valor mínimo, máximo, médio, meia e intervalo de confiança ao nível de confiança de 95% obtido para as variáveis massa em toneladas carregada nos trens e numero de trens carregados.

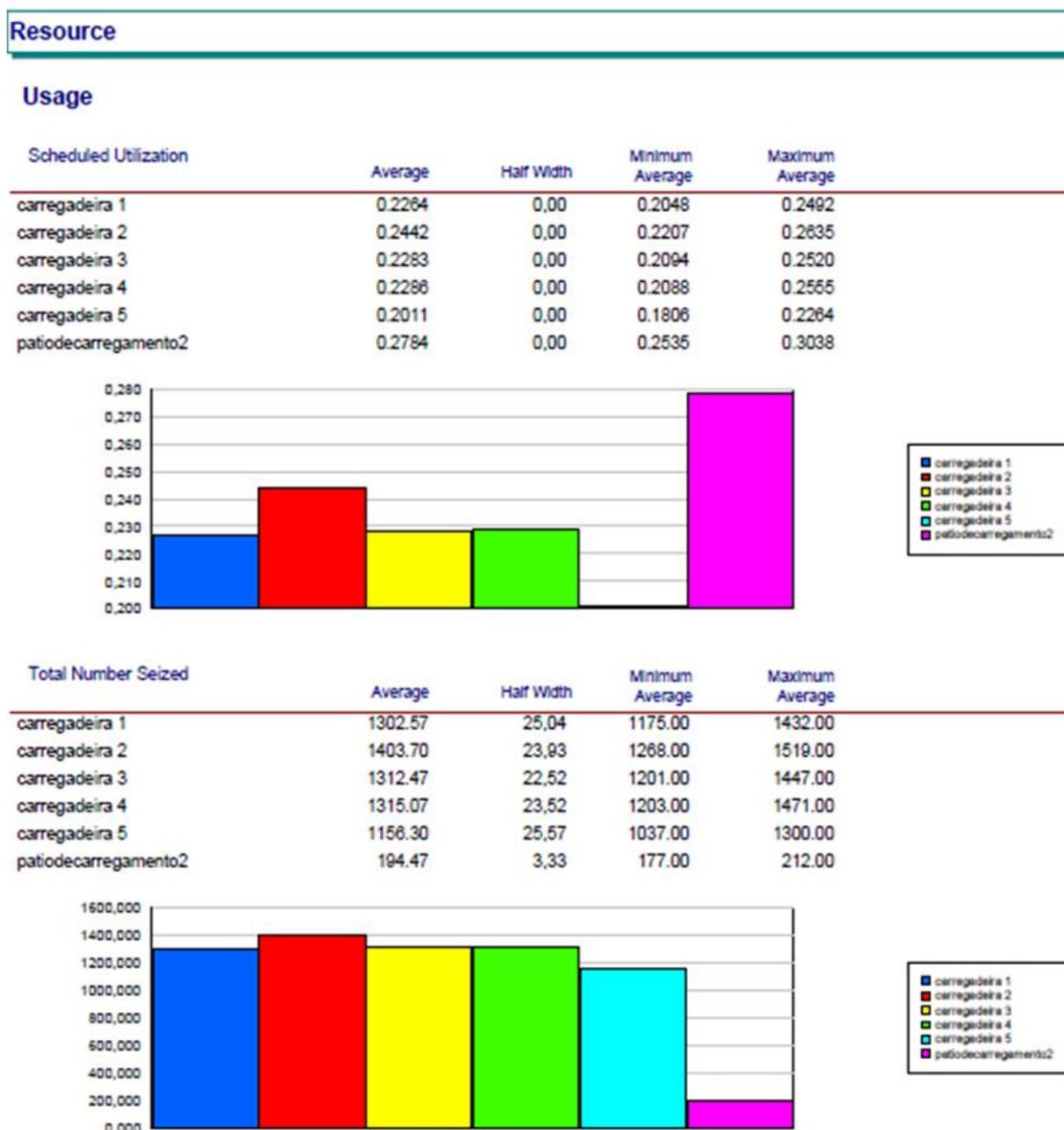
Tabela 8: Valores obtidos através dos resultados do modelo de carregamento de bauxita bruta.

variável	Média	IC (95%)	mínimo	máximo
Massa carregada nos trens (em t)	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. O valor do número de trens carregados se encontra dentro do intervalo de confiança de 95%, enquanto que o da massa carregada está fora, mas dentro da amplitude dos resultados.

Na tabela 9 é apresentada a taxa de utilização dos recursos carregadeiras e o número de vezes que estes recursos foram ocupados.

Tabela 9: Valores de utilização e número de vezes em que os recursos foram ocupados do modelo de carregamento de bauxita lavada.



Pode-se observar 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 patio está ocioso por falta de trem para carregar.

A demanda de bauxita lavada é bem maior, mas não chega a haver também formação de fila. Elas são muito pequenas. O tempo médio de espera maior 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, pois quando um trem chega o anterior já foi totalmente carregado que pode ser constatado no relatório sobre filas do arena, embora não tenha sido apresentado neste trabalho. O maior valor deste tempo foi de 0,2 minutos.

Apesar da massa carregada nos trens estar fora do intervalo de confiança, a diferença em termos percentuais do valor médio é de 6%. Talvez pudesse ser revisto algumas distribuições de entrada do modelo. Como a lógica deste modelo é exatamente igual ao da bruta que foi considerado validado, podemos concluir pela validação deste também, embora haja esta diferença de 6% em relação à massa carregada dos trens.

6.3 Validação do Modelo da britagem de bauxita Bruta

Neste caso, não se tem dados medidos para todos os parâmetros de entrada do modelo de britagem para bauxita bruta. A tentativa de validar o modelo vai ocorrer através da análise do comportamento de cenários diferentes que se obtém através da modificação de dados ou informações realizada sobre um ou mais modelos.

Todos os diferentes cenários serão rodados uma única vez e durante um período de simulação de 48h.

As comparações serão realizadas sobre as variáveis massa empilhada no patio 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 patio de britado igual a 100000 t, uma meta de britagem de 100000 t, a produtividade da sapata da moega 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 patio de britado de 3 e para a retomada da pilha pulmão de 1. Foi considerado também a manutenção de todos os equipamentos.

No início da simulação, Figura 30, o quadro de saída de resultados era o seguinte:



Figura 30: Quadro de valores no início da simulação no cenário 1.

O resultado obtido após a simulação para esse cenário está na figura 31.

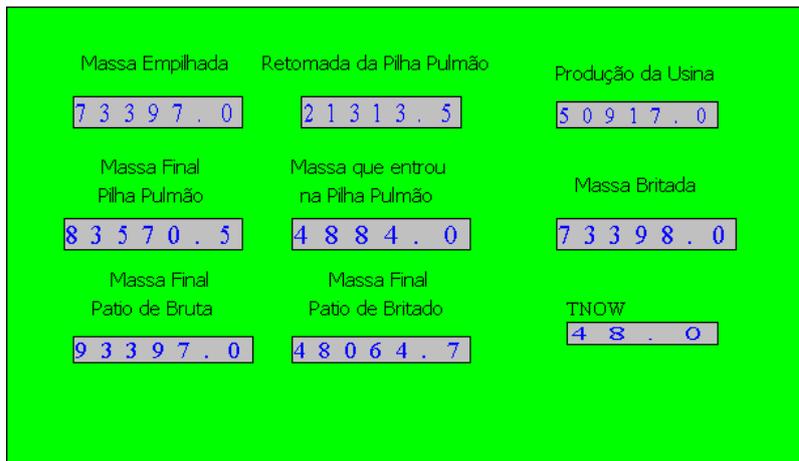


Figura 31: Quadro de resultados após a simulação do cenário 1.

Pode-se observar que houve retomada da pilha pulmão, 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 igual à massa empilhada corresponde a uma taxa de 1529 t/h, ou seja, as três frentes de lavra são responsáveis pela alimentação de uma massa no britador de 73397 t. 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 bruta.

Com 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.

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. Nestas condições o quadro de resultados obtido está apresentado na figura 32.



Figura 32: Quadro do resultado da simulação do cenário 2.

Pode se observar que neste caso 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 patio de britado, a massa que foi para a usina diminuiu, bem como a taxa horária que passou agora para 810 t/h.

Para o cenário 3 foram mantidos os mesmos parâmetros 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.

O quadro de resultados se encontra na figura 33.



Figura 33: Quadro do resultado da simulação do cenário 3.

Pode-se observar que 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.

6.4 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 vai realizar a simulação.

Serão rodados, então, diferentes cenários com uma duração de 48 horas que serão comparados entre si.

Para o cenário 1, será considerado inicialmente que a massa presente na pilha pulmão seja de 100000 t, a massa no patio de britado igual a 145000 t, uma meta de britagem de 600000 t, a produtividade da 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 patio de britado de 1 e para a retomada da pilha pulmão de 0, o valor da variável parcela igual a 0,5, ou seja, quando o minério ao mesmo tempo for alimentar a usina e ser empilhado, a parcela a ser

empilhada corresponderá a 50%. Foi considerado também a manutenção de todos os equipamentos.

A figura 34 mostra o quadro de resultados no início da simulação.



Figura 34: Quadro de valores no início da simulação no cenário 1.

Após o término da simulação, o quadro de resultados é mostrado na figura 35.



Figura 35: Quadro de valores após a simulação do cenário 1.

Pode-se observar que houve produção da usina através de alimentação proveniente do britador e da pilha de britado. A britagem contribui 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, já que cada frente contribui normalmente com 400 t/h.

Através do quadro de resultados mostrado na figura 36, cenário 1.1, pode-se observar que até aproximadamente o instante de 28.4 horas, quando a linha 1 entra em manutenção, não havia empilhamento, o que passou a ocorrer pois uma linha só 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.



Figura 36: Quadro de valores após a simulação do cenário 1.1.

Para o 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 quadro de resultados ao término da simulação é mostrado na figura 37.



Figura 37: Quadro de resultados após a simulação do cenário 2.

Observa-se que a massa britada de 55820,5 t agora foi maior devido a uma 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.

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 560000, próxima da meta de 600000t.

A figura 38 mostra o resultado final da simulação do cenário 3.

Massa Empilhada	Alimentação Pulmão	Produção da Usina
1 1 2 7 . 5	1 7 8 6 0 . 6	4 4 6 4 4 . 5
Produção da Usina via Britador	Produção da Usina via Pátio	Massa Britada
3 8 8 7 3 . 5	5 7 7 1 . 0	4 0 0 0 1 . 0
Massa Final Pilha Pulmão	Massa Final Patio de Britado	TNOW
8 2 1 3 9 . 4	1 4 0 3 4 4 . 8	4 8 . 0

Figura 38: Quadro de resultados após a simulação do cenário 3.

Verifica-se que agora a massa britada foi de 40000 t, o que faltava para completar a meta de 600000 t. A alimentação da usina via britador foi menor quando comparada com 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. Vários outros cenários poderiam ser testados, como foi realizado, embora não estejam apresentados neste trabalho.

Para se chegar a estes modelos vários outros foram construídos que precisaram de serem modificados pois não passavam pela fase de avaliação. Esta é uma fase fundamental para o uso posterior do modelo para analisar cenários alternativos ou mesmo prever o comportamento de um sistema através de um modelo que representa o cenário atual que está ocorrendo na prática.

7. CONCLUSÕES

Foram descritas de forma bem detalhada as operações envolvidas no processo de britagem dos minérios de bauxita britada bruta, britada e lavada desde a alimentação da moega do britador através de minério proveniente das frentes de lavra e pilha pulmão, empilhamento no pátio de britada e bruta até a alimentação da usina, bem como as operações de carregamento de vagões no pátio de bruta e de lavada. O acompanhamento de todas as operações foi de fundamental importância para a construção dos modelos.

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. Quando não se conseguia um ajuste, utilizava-se uma distribuição acumulada ou empírica.

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 para 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.

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.

Os modelos de carregamento de vagões tanto para o caso de bruta quanto para o caso de lavada foram validados através da comparação dos resultados da simulação com valores conhecidos já registrados que se mostraram pertencentes ao intervalo de

confiança determinado através da meia largura “*Half Width*” fornecido pelo programa Arena.

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 estes. Todos os cenários avaliados se apresentaram pertencentes ao intervalo de confiança determinado através da meia largura “*Half Width*” fornecido pelo programa Arena.

Uma vez que considerados válidos, os modelos podem ser usados para se avaliarem cenários alternativos como ficou demonstrado na parte de validação dos modelos de britagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREU, G. F. Estudo da produtividade de tratores D11T CD no método de lavra por tiras variando os ângulos do pit em uma mina de bauxita. Monografia. 52 p. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN, 2017.
2. ABDALA, F. Gestão de emissões de gases de efeito estufa. 2º Debate sobre mineração – TJ-PA e PUC/SP. Tribunal de justiça do Pará – Belém. Setembro, 2011. <http://www4.pucsp.br/direitominerario/downloads/eventos_materiais2-debate-sobre-mineracao-belem/apresentacoes/gestao-ambiental-alcoajuruti.pdf?fbclid=IwAR0oGpWWJ_XL2vuUv-UPWSsJCxG1A--izzLsqCeaQZUEGBRuF-yz4-5OdJA>
3. ALUMINIUM COMPANY OF AMERICAN - ALCOA. *Plano Integrado de Aproveitamento Econômico*. Projeto Juruti. 2009.
4. ALCOA WORLD ALUMINA (ALCOA). *Plano Integrado de Aproveitamento Econômico*. Projeto Juruti 2005.
5. ANDRADE, E. L. *Introdução a pesquisa operacional*. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC 2004. ISBN 8521614128.
6. BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas / Coord. Geral Osvaldo Barbosa Ferreira Filho; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa et al.; Brasília: ANM, 2019. 34 p.: il.
7. BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas / Coord. Geral Wagner Fernandes Pinheiro, Osvaldo Barbosa Ferreira Filho, Carlos Augusto Ramos Neves; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa... [et. Al.]; Brasília: DNPM, 2018. 33 p.: il.
8. BRETAS, V. L. Diagnóstico do consumo de água no beneficiamento de bauxita em Juruti-PA. Trabalho de conclusão de curso. UFOP. Ouro Preto. 2014.
9. CELSO, T. B. *Estudo Comparativo entre os Métodos de Decapeamento Tradicional e Wave com auxílio do SOFTWARE DOZSIM®*. Trabalho de conclusão de curso. 60 p. Universidade do Sul e do Sudeste do Pará. Marabá, 2014.
10. COSTA, M. A. B.; PEREIRA, C. R. Apostila Arena 11.0. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Engenharia de Produção. 2009.
11. FREITAS FILHO, P. J. Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena. 2 ed. Florianópolis: Visual Books. 2008.
12. HARTMAN, H et al. SME Mining Engineering Handbook. 2ª ed – Vol. 1 e 2. Society for Mining Metallurgy and Exploration. Inc.: Ann Arbor, MI, USA, 1992.

13. HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. Introductory mining engineering. 2^a ed. New Jersey, EUA: Jonh Wiley & Sons, Inc., 2002, p. 197-208.
14. KELTON, D. W.; SARDOWSKY, R. P.; SARDOWSKY, D. A. Simulation with ARENA. 5^a Edição. McGraw-Hill. 2010.
15. NETO, A. N. R.; PINTO, L. R. Template do programa ARENA para simulação das operações de carregamento e transporte em mina a céu aberto. Revista Escola de Minas (REM). Ouro Preto. Jan-Mar/2004. p. 52.
16. OLIVEIRA, R. Análise da implementação do programa de manutenção autônoma: estudo de caso em uma empresa de mineração de bauxita. Monografia (Graduação). 60 p. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 2017.
17. 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.
18. PARACAMPOS, M. P. S.; CABRAL, I. E.; Métodos para modelagem de sistemas contínuos presentes em uma planta de processamento de minério usando software *Arena Simulation*. Monografia. Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN – UFOP, 2018. p. 10.
19. PARAGON, B.M. Introdução à simulação com ARENA. São Paulo, 2006
20. PRADO, D. Usando o ARENA em simulação. Belo Horizonte (MG): Desenvolvimento Gerencial. V.3. 1999.
21. RABELO, R. J. Manual do ARENA versão 9.0. Apostila. Departamento de Automação e Sistemas - Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
22. REIS, A.; BOURSCHEID, K., REIS, M. S. A nucleação em restaurações ambientais de minas a céu aberto. Reastauração Ambiental Sistêmica (RAS). 3^a Oficina da Rede Brasileira de Restauração Ambiental (REBRE). Antonina/PR. 2014.
23. RODOVALHO, E. C.; TOMI, G. Relação entre aspectos geométricos do método de lavra por tiras e a produtividade das operações de decapeamento. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO. Rio de Janeiro, 2014.
24. SAMPAIO, J; ANDRADE, M; DUTRA A. *Bauxita*. CETEM, Rio de Janeiro: 2005.

APÊNDICES

Tabela 1: valores de variáveis e atributos definidos no modelo de bauxita lavada.

Tipo	Definição	Valor	Motivo
Intervalo de chegada de material à moega (caminhões)		CONT (0.001, 0.001, 0.191, 0.020, 0.787, 0.040, 0.957, 0.060, 0.979, 0.080, 0.979, 0.100, 0.979, 0.120, 1.0, 0.9791)	Informar de quanto em quanto tempo chega material na moega
Tempo de ciclo Pc's pulmão		CONT (0.001, 0.001, 0.010, 0.009, 0.700, 0.018, 0.880, 0.027, 0.900, 0.036, 0.940, 0.045, 0.980, 0.054, 0.980, 0.063, 0.990, 0.072, 1.000, 0.081, 1.000, 0.090)	Informar de quanto em quanto tempo vai haver descarga de material na moega proveniente da pilha pulmão
Massa de conchada pulmão	massacarr	8 + ERLA(0.454, 5)	Massa transportada pela carregadeira proveniente da pilha pulmão
Atributo	Massacaminhao	37	Massa transportada pelo caminhão
Atributo	Fator	1 ou porcentagem	O fator será responsável pelo cálculo das parcelas de material que serão enviadas para a usina/empilhamento, após o divisor de fluxo.
Atributo	Membro		Define qual carregadeira será alocada
Atributo	Carsel		Define qual carregadeira será alocada
Variável	Metabrit	(a definir)	Meta de britagem
Variável	Prodsapata	1200 t/h	Produtividade do alimentador de sapatas
Variável	massa_moega		Massa que está presente na moega do britador
Variável	Tipo de minério	"lavado"	Definir tipo de minério que irá passar na britagem
Variável	Massa_sapata		Massa presente no alimentador de sapata
Variável	Massa_brit		Massa que é passa no circuito de britagem e é comparada à meta para que o circuito pare quando se atinge a meta
Variável	massa_moegaretomada		Massa que está presente nas moegas do pátio de britado
Variável	massa_correiamoega		Massa presente no alimentador de correias das moegas
Variável	SIT_linha1	0 ou 1 (0 = operando e 1 = manutenção)	Identificar o estado da usina no momento
Variável	SIT_linha2	0 ou 1 (0 = operando e 1 = manutenção)	Identificar o estado da usina no momento
Falhas (Failures)	MTBFL1	33.63434783 h	Tempo médio entre falhas da linha 1 da usina
Falhas (Failures)	MTTRL1	1.70562500 h	Tempo médio de reparo da linha 1 da usina
Falhas (Failures)	MTBFL2	28.3638 h	Tempo médio entre falhas da linha 2 da usina
Falhas (Failures)	MTTRL2	1.875893 h	Tempo médio de reparo da linha 2 da usina
Variável	massa_usina		Massa acumulada de material que entrou na usina
Variável	massa_patiobritado		Massa presente no pátio de britado
Variável	calha_tp611A		Massa presente na calha da correia TP611A
Variável	Amarca1		Instante em que a linha 1 entra em manutenção
Variável	Amarca2		Instante em que a linha 2 entra em manutenção
Variável	Nfrentes	3	Número de frentes disponíveis na mina. Esse número pode mudar.
Variável	Capmoega 611	1850 t/h	Capacidade de material que a moega pode receber
Variável	massaretomada		Massa discreta usada na retomada do pátio de britado
Variável	Prodalimentador	Depende de quanto está retomando: Nfrentes = 2 (400 t/h); Nfrentes = 1 (800 t/h); Nfrentes = 0 (1100 t/h)	Produtividade do alimentador de correias da moega do pátio de retomada
Variável	v_manut_corr	1 (é considerada) ou 0 (não é considerada)	Define se será considerada a manutenção das linhas da usina
Variável	ncarred	1	Número de carregadeiras disponíveis para a função de retomada da pilha pulmão
Variável	ncarusina	1	Número de carregadeiras que irá alimentar a retomada do pátio de britado para envio para usina
Variável	parcela		É definida pelo usuário e se refere a parcela da quantidade de material que é enviada para empilhamento, a partir do difusor de fluxo
Atributo	Massa discreta		Quantidade de massa discretizada que irá para usina ou para o empilhamento
Variável	massa_pulmao		Massa que está presente na pilha pulmão
Variável	massaidapulmao		Contabiliza a massa produzida total referente ao pulmão
Variável	massaempilhadabritado		Total de massa empilhada no pátio
Variável	massabritador		Acumulo de massa que está indo para usina do britador
Variável	massausinapatio		Massa acumulada no pátio de bauxita lavada pela usina
Variável	naux		Número de carregadeiras alocadas em um dado instante na retomada da pilha pulmão. Esse número deve ser <= a ncarred
Variável	capmoeganaretomada		Capacidade da moega do pátio de retomada
Variável	massa	1	Massa considerada (1 tonelada) para discretização de massa a partir da moega até ao difusor de fluxo
Falhas (Failures)	MTBF Britador	38.38675000 h	Tempo médio entre falhas do britador
Falhas (Failures)	MTTR Britador	1.48026316 h	Tempo médio de reparo da britagem
Falhas (Failures)	MTBF Empilhadeira	32.19153846 h	Tempo médio entre falhas da empilhadeira
Falhas (Failures)	MTTR Empilhadeira	0.64444444 h	Tempo médio de reparo da empilhadeira

Tabela 2: valores de variáveis e atributos definidos no modelo de bauxita bruta.

Tipo	Definição	Valor	Motivo
Intervalo de chegada de material à moega (caminhões)	Cálculo definido partindo do pressuposto que os CBs estão alimentando 800 t/h	2.78 min	Informar de quanto em quanto tempo chega material na moega
Tempo de ciclo Pc's pulmão		CONT (0.001, 0.001, 0.990, 0.112, 0.990, 0.224, 0.990, 0.336, 0.990, 0.448, 0.990, 0.560, 0.990, 0.672, 0.990, 0.784, 0.990, 0.896, 0.990, 1.008, 0.990, 1.120)	Informar de quanto em quanto tempo vai haver descarga de material na moega proveniente da pilha pulmão
Massa de conchada pulmão	massacarr	NORM(9.75, 0.838)	Massa transportada pela carregadeira proveniente da pilha pulmão
Atributo	massacaminhao	37	Massa transportada pelo caminhão
Atributo	membro		Define qual carregadeira será alocada
Atributo	Carsel		Define qual carregadeira será alocada
Variável	metabruta	(a definir)	Meta de britagem
Variável	prodsapata	1200 t/h	Produtividade do alimentador de sapatas
Variável	massa_moega		Massa que está presente na moega do britador
Variável	massa_pulmao_bruta		Massa de bauxita bruta vinda da mina e descarregada no pulmão de bruta.
Variável	Tipo de minério	"bruta"	Definir tipo de minério que irá passar na britagem
Variável	Massa_sapata		Massa presente no alimentador de sapata
Variável	Massabruta		Massa que é passa no circuito de britagem e é comparada à meta para que o circuito pare quando se atinge esse valor
Variável	massa_moegaretomada		Massa que está presente nas moegas do pátio de britado
Variável	massa_correiamoega		Massa presente no alimentador de correias das moegas
Variável	SIT_linha1	0 ou 1 (0 = operando e 1 = manutenção)	Identificar o estado da usina no momento
Variável	SIT_linha2	0 ou 1 (0 = operando e 1 = manutenção)	Identificar o estado da usina no momento
Falhas (Failures)	MTBFL1	33.63434783 h	Tempo médio entre falhas da linha 1 da usina
Falhas (Failures)	MTTRL1	1.70562500 h	Tempo médio de reparo da linha 1 da usina
Falhas (Failures)	MTBFL2	28.3638 h	Tempo médio entre falhas da linha 2 da usina
Falhas (Failures)	MTTRL2	1.875893 h	Tempo médio de reparo da linha 2 da usina
Variável	massa_usina		Massa acumulada de material que entrou na usina
Variável	massa_patiobritado	100000	Massa presente no pátio de britado
Variável	calha_tp611A		Massa presente na calha da correia TP611A
Variável	Amarca1		Instante em que a linha 1 entra em manutenção
Variável	Amarca2		Instante em que a linha 2 entra em manutenção
Variável	Nfrentes	(a definir)	Número de frentes disponíveis na mina. Esse número pode mudar.
Variável	Capmoega 611	1850 t/h	Capacidade de material que a moega pode receber
Variável	massaretomada		Massa discreta usada na retomada do pátio de britado
Variável	Prodalimentador	Depende de quantas linhas operando: 2 linhas operando = 1100 t/h; 1 linha operando = 600 t/h	Produtividade do alimentador de correias da moega do pátio de retomada
Variável	v_manut_corr	1 (é considerada) ou 0 (não é considerada)	Define se será considerada a manutenção das linhas da usina
Variável	ncarred	1	Número de carregadeiras disponíveis para a função de retomada da pilha pulmão
Variável	ncarusina	1	Número de carregadeiras que irá alimentar a retomada do pátio de britado para envio para usina no caso em que a britagem está produzindo bruta
Variável	massa_pulmao		Massa que está presente na pilha pulmão
Variável	massaidapulmao		Contabiliza a massa produzida total referente ao pulmão
Variável	massaempilhadabritado		Total de massa empilhada no pátio
Variável	massabritador		Acumulo de massa que está indo para usina do britador
Variável	massausinapatio		Massa acumulada no pátio de bauxita lavada pela usina
Variável	naux		Número de carregadeiras alocadas em um dado instante na retomada da pilha pulmão. Esse número deve ser <= a ncarred
Variável	capmoeganaretomada		Capacidade da moega do pátio de retomada
Variável	Massa	1	Massa considerada (1 tonelada) para discretização de massa
Falhas (Failures)	MTBF Britador	38.38675000 h	Tempo médio entre falhas do britador
Falhas (Failures)	MTTR Britador	1.48026316 h	Tempo médio de reparo da britagem
Falhas (Failures)	MTBF Empilhadeira	32.19153846 h	Tempo médio entre falhas da empilhadeira
Falhas (Failures)	MTTR Empilhadeira	0.64444444 h	Tempo médio de reparo da empilhadeira

