



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



MARCOS PAULO SALOMÃO PARACAMPOS

**Métodos para modelagem de sistemas contínuos presentes em uma planta de  
processamento de minério usando software *Arena Simulation***

OURO PRETO

2018

MARCOS PAULO SALOMÃO PARACAMPOS

Métodos para modelagem de sistemas contínuos presentes em uma planta de processamento de minério usando software *Arena Simulation*

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Operações

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

OURO PRETO

2018

P21m

Paracampos, Marcos Paulo Salomão.

Métodos para modelagem de sistemas contínuos presentes em uma planta de processamento de minério usando software Arena Simulation [manuscrito] / Marcos Paulo Salomão Paracampos. - 2018.

32f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral.

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

1. Métodos de simulação. 2. Modelagem. I. Cabral, Ivo Eyer. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.3-048.63

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto: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

Aos 17 dias do mês de dezembro de 2018, às 14h00min, 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 “**MÉTODOS PARA MODELAGEM DE SISTEMAS CONTÍNUOS PRESENTES EM UMA PLANTA DE PROCESSAMENTO DE MINÉRIOS, USANDO O SOFTWARE ARENA SIMULATION**”, pelo aluno **Marcos Paulo Salomão Paracampos**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral (Orientador)**, **Prof. Dr.º Carlos Enrique Arroyo Ortiz** e **Prof. Dr.º Elton Destro**

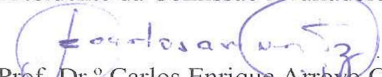
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela aprovação do candidato, com a nota 8,7, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

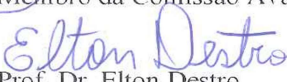
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

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, 17 de dezembro de 2018.

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

  
Prof. Dr.º Carlos Enrique Arroyo Ortiz  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Prof. Dr. Elton Destro  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Marcos Paulo Salomão Paracampos

  
Prof. M.Sc. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Trabalho de Conclusão de Curso

## RESUMO

O trabalho aborda a construção de um modelo que possa representar um sistema de fluxo contínuo em uma planta de beneficiamento mineral utilizando três metodologias diferentes. Utilizou-se um transportador de correia como o sistema a ser simulado utilizando o software *Arena Simulation* 15.1 em sua versão estudante. Para a construção, o fluxo contínuo presente no transportador de correia foi representado através da discretização do fluxo contínuo por massa e por tempo e com a utilização dos módulos presentes no *template Flow Process*. Após a modelagem, foi possível observar que as três formas analisadas simulam o fluxo contínuo presente no transportador com algumas diferenças em seu funcionamento, diferenças que são consideradas ou não em função do modelo ter um viés mais operacional ou estratégico.

Palavras-chave: Eventos discretos. Simulação. Modelagem.

## **ABSTRACT**

The final paper deals with the construction of a model that can represent a continuous flow system in a mineral processing plant using three different methodologies. A belt conveyor was used as the object to be simulated using the Arena Simulation 15.1 software in its student version. For the construction, the continuous flow present in the belt conveyor was represented using the discretization of the continuous flow by mass and time and with the use of the modules present in the Flow Process template. After the modeling, it was possible to observe that the three forms of modeling simulate the continuous flow present in the conveyor with some differences in its operation, differences that are considered or not depending on whether the model has a more operational or strategic bias.

Keywords: Discret event. Simulation. Modelling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos sistemas para fins de modelagem.....	10
Figura 2 - Representação dos fluxos contínuos e discretos. ....	15
Figura 3 - Modelagem discreta e contínua com alta e baixa precisão.....	16
Figura 4 - Configuração do módulo Create.....	17
Figura 5 - Configuração do módulo Process.....	18
Figura 6 - Configuração do módulo Delay.....	18
Figura 7 - Visão geral do modelo discretizado por massa.....	19
Figura 8 - Lógica para chegada de material. ....	20
Figura 9 - Representação geral do modelo dicretizado por tempo.....	21
Figura 10 - Configuração do módulo Tank.....	22
Figura 11 - Configuração do módulo Flow para adicionar material. ....	23
Figura 12 - Configuração do módulo Flow para remover material.....	24
Figura 13 - Módulo Assign.....	24
Figura 14 - Visão geral do modelo usando o template Flow Process. ....	25
Figura 15 - Modelo e gráfico discretizado por massa. ....	26
Figura 16 - Modelo e gráfico dicretizado por tempo.....	27
Figura 17 - Modelo e gráfico usando template Flow Process. ....	28

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
2 OBJETIVOS.....	7
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1 SOFTWARE ARENA SIMULATION.....	8
<b>3.1.1 Módulos do Arena.....</b>	<b>8</b>
3.2 ABORDAGEM CLÁSSICA.....	10
<b>3.2.1 Classificação dos sistemas para modelagem e simulação.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.2 Variáveis de Estado.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.3 Eventos.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.4 Entidades.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2.4 Recursos e filas.....</b>	<b>12</b>
3.3 CONTEXTO ATUAL DA SIMULAÇÃO.....	12
<b>3.3.1 <i>Analytics</i> e Indústria 4.0.....</b>	<b>12</b>
3.4 DISCRETIZAÇÃO E SEMELHANÇA COM O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS.....	13
4 METODOLOGIA.....	14
4.1 DISCRETIZAÇÃO POR MASSA.....	14
4.2 DISCRETIZAÇÃO POR TEMPO.....	16
4.3 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NO SOFTWARE ARENA SIMULATION.....	17
<b>4.3.1 Modelo baseado na discretização por massa.....</b>	<b>17</b>
<b>4.3.2 Modelo baseado na discretização por tempo.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3.3 Modelo construído utilizando o <i>template Flow Process</i>.....</b>	<b>21</b>
5 RESULTADOS.....	26
6 CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
APÊNDICE.....	31



## 1 INTRODUÇÃO

Desde o momento crítico da economia em 2008, a prática de redução de custos nas plantas de produção juntamente com o ajuste da produção em função da demanda e da variabilidade de produtos para um mercado consumidor cada vez mais exigente é um ponto frequente na pauta dos gestores.

No contexto da indústria 4.0 em que os sistemas estão interligados e a flexibilidade da planta de produção é requerida para determinados momentos do mercado (flutuações da demanda, do tipo de produto, etc) (HOWARD, 2017), os sistemas produtivos estão cada vez mais complexos exigindo dos gestores tomada de decisões rápidas e assertivas para entregar o produto para o cliente no prazo combinado e evitar perdas com paradas não programadas, ajustes/calibração para produzir determinado tipo de produto, etc.

Dentro desse contexto, a simulação de sistemas tem seu papel como ferramenta auxiliar para a tomada de decisões rápidas levando em consideração a demanda, especificidade do produto e os equipamentos disponíveis.

Na mineração, percebe-se um conjunto de atividades, desde as mais simples como carregamento e transporte de material por caminhões, até atividades mais complexas, que ocorrem dentro de uma planta de beneficiamento.

Olhando as atividades de mineração sob ponto de vista da simulação, atividades simples como transporte através de caminhão podem ser facilmente representadas por um sistema discreto. Quando se olha, por exemplo, para a planta de beneficiamento, onde observam-se rotas de fluxo de material de maneira contínua (britador, transportador de correia, etc), a abordagem pela simulação deve considerar um sistema contínuo e não discreto.

Devido às características da planta, faz-se necessário criar modelos que representem bem um fluxo contínuo de material, como o que acontece em uma correia transportadora. Dessa forma, este trabalho busca avaliar técnicas para a construção de modelos de fluxo contínuo utilizando o software *Arena Simulation*.

## 2 OBJETIVOS

### Objetivos gerais

1. Modelar e simular um sistema contínuo representando um componente de uma planta de beneficiamento de minério usando ferramentas do software *Arena Simulation* e analisar as diferenças dos métodos construtivos.

### Objetivos específicos

1. Modelar e simular um equipamento com fluxo contínuo de massa, transportador de correias, utilizando discretização por massa, por tempo e através de módulos presentes no *template Flow Process*.
2. Avaliar as diferenças dos métodos construtivos e utilização destes na construção de modelos com sistemas contínuos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 SOFTWARE ARENA SIMULATION

O software de simulação *Arena* permite modelar diversos tipos de processos que apresentam uma sequência de eventos discretos com o tempo. Sistemas de logística de caminhões e trens, fluxo de pessoas e atendimento em um supermercado ou hospital e processos produtivos são exemplos de processos que podem ser simulados utilizando o ambiente de programação do *Arena*. O software apresenta-se de forma de fácil entendimento com processo de modelagem feita de maneira visual pelo usuário.

##### 3.1.1 Módulos do Arena

O Arena apresenta uma variedade de módulos separados em *templates*. Cada módulo possui uma ideia central de utilização, porém a depender da necessidade durante a modelagem o módulo pode ser utilizado de forma criativa e diferente do usual para alcançar o efeito desejado.

A seguir são apresentados de forma resumida as principais utilizações dos módulos do Arena utilizados neste estudo.

##### *Template Basic Process*

- 1) Módulo *Create*: É módulo mais elementar do Arena, onde a partir dele cria-se as entidades necessárias para utilizar no modelo.
- 2) Módulo *Dispose*: Após as entidades serem criadas e utilizadas dentro do modelo, é necessário que elas sejam retiradas do sistema para que não venham sobrecarregá-lo, dessa forma o módulo *Dispose* é utilizado com esse intuito.
- 3) Módulo *Assign*: Sua principal utilização está em criar variáveis, atributos e atribuir e/ou alterar valores durante a simulação. De maneira geral o módulo *Assign* pode ser utilizado para manipular valores e alterar variáveis internas do *Arena*. Como exemplo, podemos criar variáveis para a contagem de eventos e o cálculo acumulado de alguma variável de interesse.

- 4) Módulo *Process*: Este módulo é utilizado para programar atividades que demandam um tempo de duração podendo ou não utilizar um ou mais recursos necessários para as suas realizações. Com o uso de recursos faz necessário limitar a sua capacidade de utilização ou atendimento no módulo de dados Resource. Como exemplo, pode-se citar um torno que tem capacidade de trabalhar com uma peça por vez. O torno seria definido como recurso com capacidade um.
- 5) Módulo *Separate*: O módulo é utilizado para separar lotes temporários de entidades criados anteriormente ao módulo *Separate*. Da mesma forma, o *Separate* é utilizado para criar réplicas de entidades de acordo com a necessidade.

#### *Template Advanced Process.*

- 1) Módulo *Delay*: Possui utilização indicada quando se deseja apenas simular uma passagem de tempo sem ocorrer ocupação de recurso ou para que ocorra a mudança de estado de alguma variável.
- 2) Módulo *Hold*: Este é utilizado para reter entidades, funcionando como uma espécie de “depósito” até que uma condição possa ser satisfeita ou que outro módulo como o *Remove* seja ativado e retire a entidade da fila do *Hold*.

#### *Template Flow Process.*

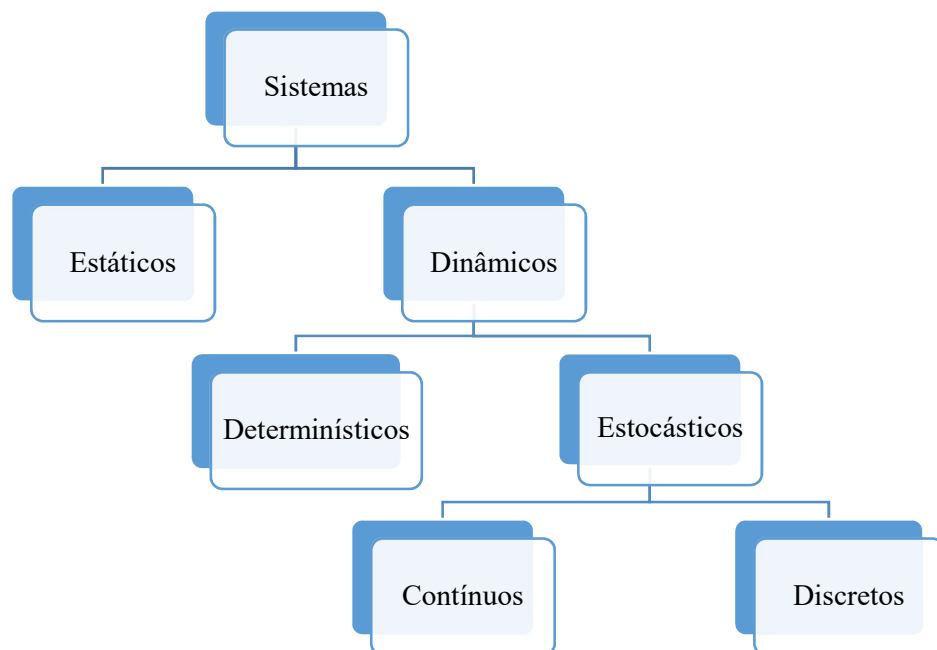
- 1) Módulo *Tank*: O módulo é utilizado para simular algum processo de fluxo contínuo que pode ou não armazenar material no seu interior. Na simulação de um transportador de correias por exemplo, este possui a característica onde a mesma quantidade de material que entra é igual à que sai, logo o módulo *Tank* pode ser adaptado para ser utilizado como uma correia, desde que a quantidade que entra seja igual à quantidade que sai.
- 2) Módulo *Seize Regulator*: O módulo funciona como auxiliar “necessário” ao módulo *Tank*, para que as calhas de entrada e saída do equipamento simulado sejam ocupadas para receber o material de entrada ou saída.
- 3) Módulo *Flow*: É um módulo necessário junto ao funcionamento do módulo *Tank* para que o material recebido possa entrar no equipamento ou o material já presente nele possa ser retirado.
- 4) Módulo *Release Regulator*: Da mesma forma que o módulo *Seize Regulator* é utilizado para ocupar as calhas de entrada e/ou saída, o módulo *Release Regulator* atua de forma a desocupar as calhas do equipamento.

## 3.2 ABORDAGEM CLÁSSICA

### 3.2.1 Classificação dos sistemas para modelagem e simulação

Os sistemas no mundo real podem ser classificados segundo a figura 1 para facilitar o processo de modelagem.

Figura 1- Classificação dos sistemas para fins de modelagem.



Fonte: Freitas (2008).

Quando se leva em consideração o comportamento do sistema em relação ao tempo, os sistemas se classificam em:

- a) estático: representa um sistema onde a variação do tempo não altera o modelo, (exemplo: solução de problemas de otimização);
- b) dinâmico: representa um sistema em que suas variáveis de estado alteram com o tempo, ou seja, a presença de variáveis que estão indexadas ao tempo, como exemplo pode-se citar uma variável que retrata a variação do seu valor médio durante a simulação.

Quanto aos valores de entrada e saída do modelo, estes podem ser classificados em:

- a) determinístico: quando o modelo tem um conjunto de entrada de dados conhecidos e a partir do qual resultará em um único conjunto de resultados;
- b) estocástico: quando o conjunto de dados de entrada do modelo possui variáveis aleatórias. Exemplo: o tempo de operação de uma máquina pode variar de um valor mínimo de 10 minutos a um valor máximo de 20 minutos, e com valor mais provável de 15 minutos, sendo representado por uma distribuição triangular,  $TRIA(10,15,20)$ .

Quanto à variação das variáveis de estado, classificam-se em:

- a) contínuos: quando a mudança de estado das variáveis ocorre de maneira contínua;
- b) discretos: quando a mudança de estado das variáveis ocorre em pontos discretos do tempo.

### 3.2.2 Variáveis de Estado

São variáveis definidas de acordo com o propósito do estudo e que determinam o estado do sistema. Para um modelo de uma fábrica, a variável que guarda o estado do equipamento ou aquela que define a quantidade de peças que estão em espera para serem processadas na máquina, é um exemplo de variável de estado (FREITAS, 2008).

### 3.2.3 Eventos

São ocorrências que promovem a alteração de estado de um sistema. Quando ocorre um evento, há também uma ou mais mudanças de valor nas variáveis de estado. A chegada de uma peça em uma máquina é um evento que, por consequência, altera o número de peças em fila e/ou estado do equipamento (FREITAS, 2008).

### 3.2.4 Entidades

Entidades são objetos utilizados na modelagem para mudar o estado de uma ou mais variáveis. Como objetos, elas precisam de uma definição. Voltando ao exemplo da fábrica, uma peça que entra na máquina pode ser representada por uma entidade.

A depender dos objetivos do estudo, as entidades precisam ser individualizadas atribuindo características a elas como tipo de peça 1 ou 2 que entra na máquina, ou seja, os atributos são as características dadas a cada entidade. Uma aplicação do uso do atributo é quando se deseja coletar algumas estatísticas como lead time (intervalo de tempo desde o início do processo até o final) ou guardar algumas informações como velocidade ou massa em cada entidade (FREITAS, 2008).

### 3.2.4 Recursos e filas

Recursos são entidades estáticas que interagem com as entidades dinâmicas (FREITAS, 2008). No exemplo de uma fábrica, uma peça ao ser processada por uma máquina, a máquina representa um recurso. Caso o recurso esteja ocupado, a entidade peça segue para uma fila e permanece nesta até o recurso ficar livre.

## 3.3 CONTEXTO ATUAL DA SIMULAÇÃO

### 3.3.1 *Analytics* e Indústria 4.0

No atual momento quando a automação e a coleta de informações de produção e consumo têm ganhado muito espaço nos meios de produção, gerando uma grande quantidade de dados que são utilizados para estudar gargalos no atual processo, prever situações futuras e auxiliar na tomada de decisões, a simulação de processos possui grande utilidade devido à disponibilidade de dados e à necessidade de se ter cada vez mais ferramentas no apoio de tomada decisões.

Nesse contexto, um novo campo que abrange técnicas matemáticas, estatísticas, modelagem preditiva e *machine learning* tem conquistado espaços nos diversos sistemas de produção, conhecido como *Analytics* ou inteligência analítica (INGLE, 2018). Como pode-se perceber, a simulação de processos está incluída no termo *Analytics*, deixando-se de ser conhecida na sua forma clássica dentro do termo “Pesquisa Operacional” e utilizando-se agora do termo *Analytics*.

Vale ressaltar que na era da indústria 4.0 onde todo o processo produtivo está interligado através de tecnologias inteligentes para tomada de decisões rápidas e descentralizadas, a simulação tem seu espaço nesse conjunto quando o modelo construído estiver integrado ao sistema.

Em uma fábrica inteligente, por exemplo, as informações que normalmente são utilizadas como *input* no modelo estão disponíveis e atualizadas em tempo real. Estas informações em um sistema integrado pela internet das coisas (IoT) – comunicação integrada aos equipamentos – e uma nuvem (*cloud computing*) – serviço de armazenamento de dados – fornecem ao modelo em tempo real a atual situação do processo produtivo auxiliando na tomada de decisões que podem envolver ajuste de demanda prevendo os serviços e equipamentos que seriam afetados juntamente com a qualidade do produto.

### 3.4 DISCRETIZAÇÃO E SEMELHANÇA COM O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

No estudo de sistemas complexos, é comum que o problema seja analisado em pequenas partes, simplificando a análise e a obtenção de resultados para a parte pequena e, assim, a partir de teorias como a do princípio de conservação da massa, quantidade de movimento e energia é possível expandir as conclusões obtidas com uma pequena parte para o todo.

O Método de Volumes Finitos é conhecido de maneira geral por discretizar, dividir o contínuo em partes menores e iguais (ARAÚJO, 2017) e após realizar o estudo sobre a parte discretizada, integrar ou somar as partes que foram estudadas, obtendo assim a variação da variável procurada (RESENDE, 2009).



## 4 METODOLOGIA

Segundo OUELLET (2017) a construção do modelo que representa o fluxo contínuo de minério em uma correia transportadora pode ser abordada de três formas:

- a) discretização por massa;
- b) discretização por tempo;
- c) uso do *template Flow Process*.

Para a modelagem utilizou-se o software *Arena Simulation* em sua versão estudante 15.10 adotando-se as seguintes premissas:

- a) o material chegará a uma taxa constante de 3000 t/h na alimentação das correias;
- b) para o sistema modelado será apenas considerado o fluxo do material, desprezando assim lógicas de apoio que preveem bloqueios por excesso de material na entrada da correia, por equipamentos seguintes não estarem solicitando material do equipamento anterior ou paradas por manutenções corretivas e/ou preventivas.

A vazão, velocidade  $V_c$  e comprimento da correia  $L_c$  são 2800 t/h, 3 m/s e 300 metros respectivamente.

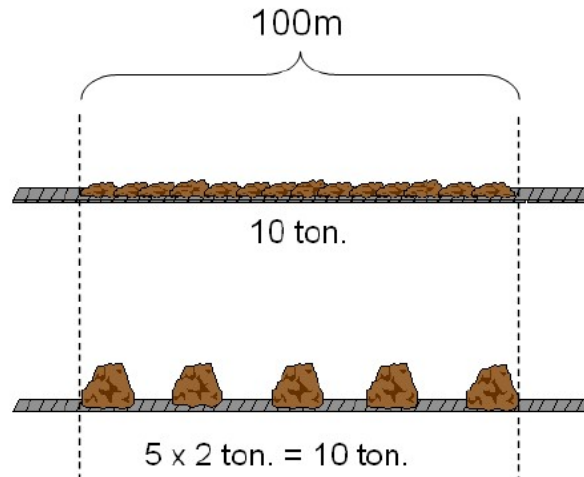
A escolha de uma vazão de entrada de material maior que a vazão nominal do equipamento modelado, justifica-se como método para validar o funcionamento do sistema, sendo que ao exceder a capacidade de transferência de material, o sistema modelado deverá manter sua vazão nominal mesmo com excesso de material na entrada.

### 4.1 DISCRETIZAÇÃO POR MASSA

Utilizando a mesma ideia do Método de Volumes Finitos, o fluxo da correia é dividido em partes menores e iguais. O número de entidades discretizadas será em função da precisão dos resultados desejados e da performance no momento de executar o modelo.

Ao dividir a entidade de entrada em unidades menores, na verdade estaremos criando um fluxo de sistema discreto, porém com comportamento bem próximo de um fluxo contínuo como observa-se na figura 2.

Figura 2 - Representação dos fluxos contínuos e discretos.



Fonte: Fioroni *et al.* (2014).

Para o dimensionamento de um transportador de correia, algumas variáveis devem ser consideradas:

- densidade linear do material na correia  $D_m$  (unidade de massa por unidade de comprimento) conforme a equação 1;
- comprimento da correia  $L_c$ .
- comprimento que a entidade ocupa na correia  $L_e$  (razão entre a massa da entidade  $M_e$  e a densidade linear) conforme a equação 2;
- tempo para a entidade liberar espaço na correia conforme a equação 3;
- tempo para a entidade percorrer toda a correia conforme a equação 4.

$$D_m = \frac{\text{Vazão}}{\text{Velocidade}} \quad (1)$$

$$L_e = \frac{M_e}{D_m} \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{L_e}{V_c} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{L_c + L_e}{V_c} \quad (4)$$

Ao discretizar por massa, cada entidade irá acessar a correia em função de haver vaga disponível. O acesso das entidades à correia será controlado a partir do tempo que após uma entidade ocupar uma vaga é necessário uma demora de tempo para percorrer o comprimento que ocupa na correia. Esse cálculo é feito a partir da densidade linear juntamente com a velocidade da correia e a massa da entidade discretizada.

Após a entidade ocupar um espaço na correia, essa demanda um certo tempo para percorrê-la. O tempo para chegar ao ponto final é obtido a partir da relação do comprimento que uma entidade ocupa na correia, comprimento da correia e a velocidade do equipamento.

Com esses dois tempos, tempo para liberar acesso a entidade anterior na correia e o tempo para percorrer a correia, será possível construir um modelo que simule o equipamento.

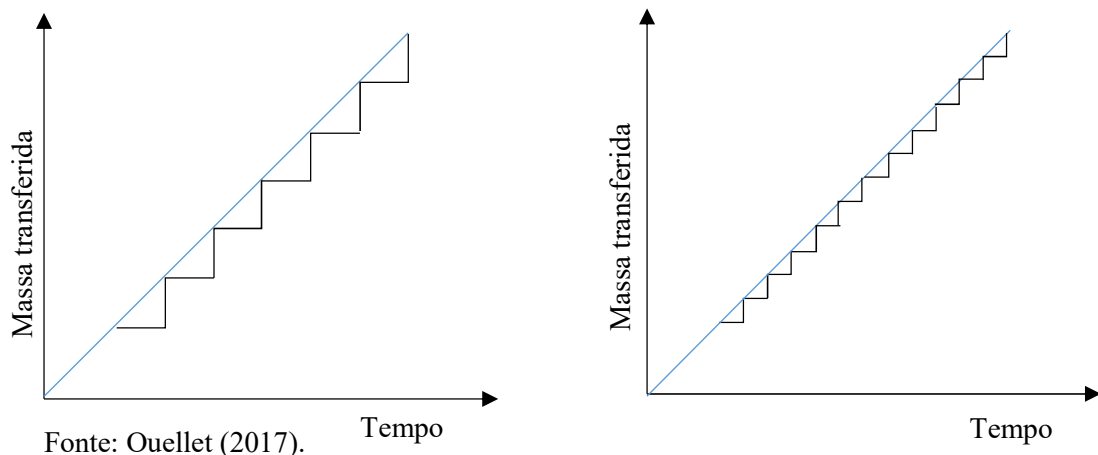
Ao final do processo, cada entidade irá alterar o estado de uma variável de estado que guarda a massa acumulada transferida pela correia.

#### 4.2 DISCRETIZAÇÃO POR TEMPO

Na discretização por tempo, considera-se que uma certa quantidade de massa é transferida por unidade de tempo. Nesse caso, ao invés de discretizar a massa, o tempo é discretizado.

Quanto menor o intervalo de tempo de discretização mais próximo o modelo estará do real como pode-se observar na figura 3, porém a performance do modelo poderá ser comprometida.

Figura 3 - Modelagem discreta e contínua com alta e baixa precisão.



Fonte: Ouellet (2017).

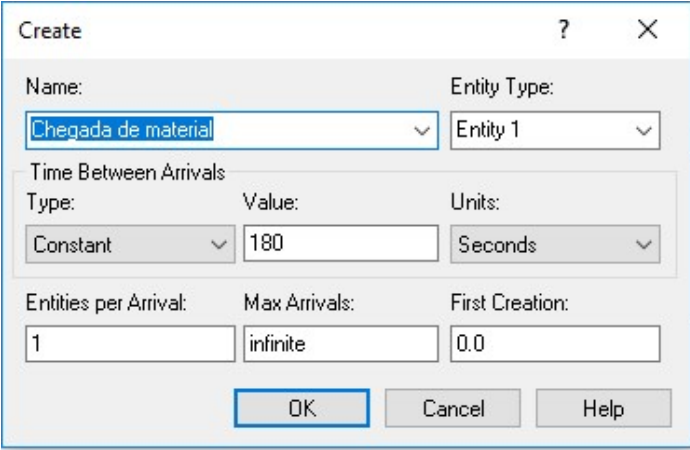
### 4.3 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NO SOFTWARE ARENA SIMULATION

#### 4.3.1 Modelo baseado na discretização por massa

Para construir esse modelo, foi utilizado em sua grande maioria os módulos do *template Basic Process*.

Representando a chegada de material, utilizou-se o módulo *Create* gerando uma entidade a cada 180 segundos, intervalo de tempo suficiente para simular uma taxa de 3000 t/h em que cada entidade criada pelo módulo representa uma unidade de carga de 150 toneladas (ver figura 4).

Figura 4 - Configuração do módulo Create.



Name:		Entity Type:	
Chegada de material		Entity 1	
Time Between Arrivals			
Type:	Value:	Units:	
Constant	180	Seconds	
Entities per Arrival:	Max Arrivals:	First Creation:	
1	infinite	0.0	

Logo em seguida, utilizou-se o módulo *Separate* para discretizar a entidade de entrada em 10 entidades, cada uma com massas de 15 toneladas.

Para limitar a entrada de entidades na correia, já que o acesso deve ser de uma em uma, utilizou-se o módulo *Process* atribuindo um recurso (calha virtual) de capacidade um para que a entrada de entidades seja de uma por vez. A configuração utilizada pode ser observada na figura 5.

Figura 5 - Configuração do módulo Process.

The screenshot shows the 'Process' configuration dialog box with the following settings:

- Name:** Intervalo aguarda vaga na correia
- Type:** Standard
- Logic:**
  - Action:** Seize Delay Release
  - Priority:** Medium(2)
  - Resources:** Resource, cv in 1
- Delay Type:** Constant
- Units:** Seconds
- Allocation:** Value Added
- Value:** 19.28
- Report Statistics

No mesmo módulo foi configurado o tempo necessário para que uma entidade libere o espaço na correia para que a entidade que está logo atrás possa acessá-la. Os cálculos feitos para obtenção dos tempos de liberação de espaço na correia e tempo de percurso se encontram no apêndice.

Em seguida, utilizou-se o módulo *Delay* encontrado no *template Advanced Process* para representar o tempo de percurso da entidade na correia (figura 6).

Figura 6 - Configuração do módulo Delay.

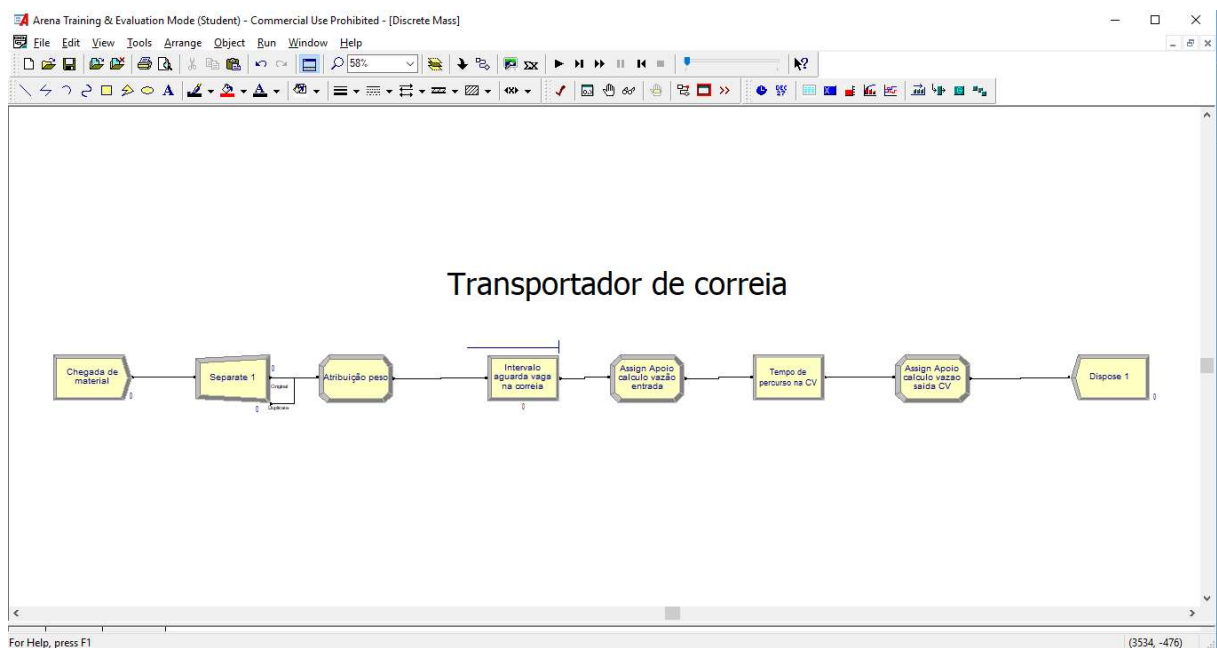
The screenshot shows the 'Delay' configuration dialog box with the following settings:

- Name:** Tempo de percurso na CV
- Allocation:** Other
- Delay Time:** 119.28
- Units:** Seconds

Após a entidade sair do módulo *Delay*, esta segue para um módulo *Assign* para contabilizar a quantidade de material transferido e calcular o número de eventos através de uma variável, onde cada entidade passante soma-se o valor um a variável que armazena o número de eventos. O número de eventos acumulados armazenado nesta variável foi utilizado para comparação entre as três formas de modelagem usadas neste trabalho. No fim, utilizou-se um módulo *Dispose* para retirar a entidade do sistema.

O modelo completo pode ser visto na figura 7 com alguns módulos extras *Assign* utilizados para guardar as informações de entrada e saída da correia, apenas para conferência de dados.

Figura 7 - Visão geral do modelo discretizado por massa.



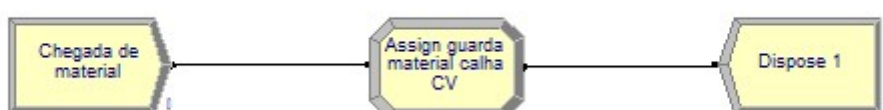
#### 4.3.2 Modelo baseado na discretização por tempo

O modelo foi construído de tal forma que apenas uma única entidade controla o fluxo de material dentro de um equipamento. Para que essa entidade possa realizar o fluxo em função da disponibilidade do material, precisa-se trabalhar com um conceito de calha virtual no equipamento mesmo que na realidade essa calha não exista. A existência da calha virtual

justifica-se pelo método construtivo, onde é utilizado como um indicador se o equipamento anterior disponibilizou material para o equipamento que realizará a transferência do material.

Diferente do modelo anterior onde a chegada do material estava interligada com a correia diretamente, neste modelo a chegada do material é representada de maneira separada e sua comunicação é a partir de uma variável de estado que representa a calha virtual da correia (figura 8). Esta calha recebe material ao mesmo tempo que envia através da correia.

Figura 8 - Lógica para chegada de material.



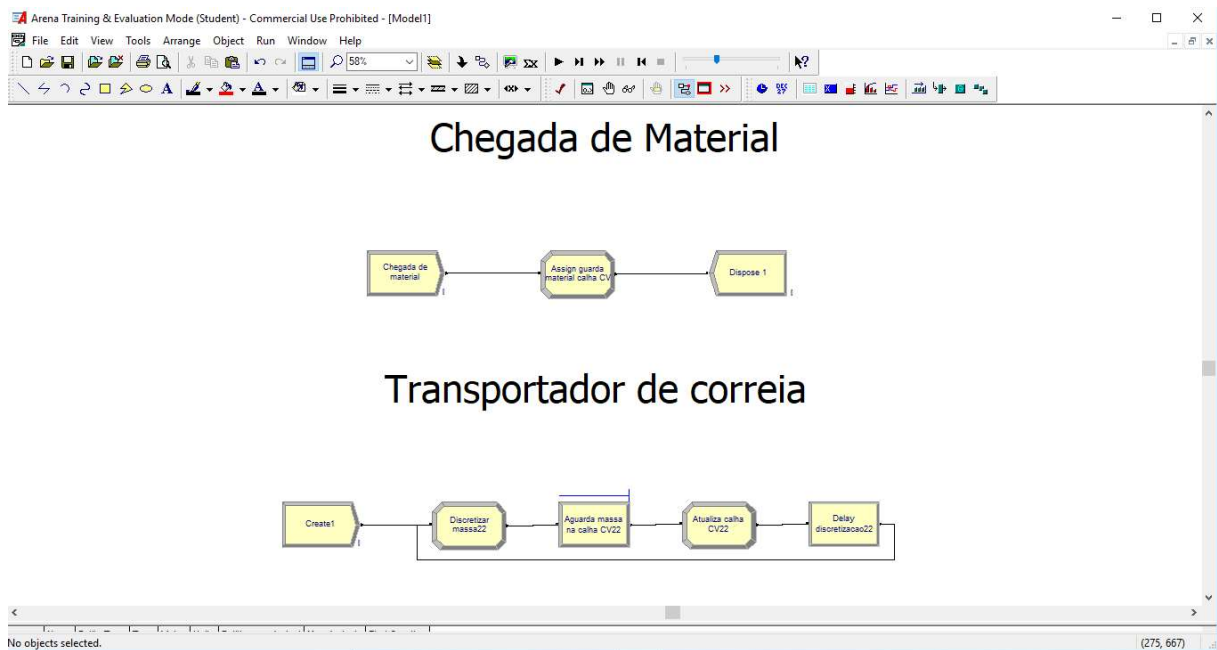
Representando a correia, apenas uma entidade é criada através de um módulo *Create*. Logo em seguida calcula-se dentro de um módulo *Assign* quanto do material será transferido dentro do tempo discretizado, valor obtido quando relaciona-se a vazão pelo tempo discretizado.

Logo após, a entidade entra em um módulo *Hold* para realizar o controle do fluxo de massa em função dos critérios definidos pelo modelador. Nesse módulo utilizou-se a condição de que a massa calculada no módulo anterior, *Assign*, seria transferida apenas quando essa fosse menor ou igual a quantidade de massa presente na variável de estado que representa a calha virtual da correia.

Assim que a entidade é liberada do módulo *Hold*, segue para um módulo *Assign* que irá atualizar a calha da correia, devido à transferência de uma certa quantidade de material, e contabilizará com o auxílio de uma variável a contagem do número de eventos. Logo após a mesma entidade passa por um módulo *Delay* que estará configurado segundo o tempo de discretização. Depois da entidade passar pelo módulo *Delay* ela retorna para o início da lógica com o objetivo de sempre verificar se há material disponível e suficiente na calha virtual para ser transferido através da correia.

A figura 9 representa de maneira geral o modelo construído com a chegada de material na parte superior e na parte inferior a lógica do transportador de correia.

Figura 9 - Representação geral do modelo discretizado por tempo.



#### 4.3.3 Modelo construído utilizando o *template Flow Process*

Os módulos utilizados do *template Flow Process* para construir a lógica que represente um transportador de correia, foram: *Tank*, *Seize Regulator*, *Flow* e *Release Regulator*.

Os módulos presentes nesse *template* trabalham com a ideia de calha virtual de entrada e saída do material do equipamento. As calhas são configuradas como *regulators* no módulo *Tank* como pode-se observar na figura 10. Em cada *regulator* define-se a vazão máxima. Para o estudo em questão definiu-se os valores 2800 t/h para entrada e saída de material. No campo *capacity*, o valor escolhido não fará diferença, pois o sistema modelado realiza apenas transferência de material, não realizando qualquer tipo de armazenamento.



Figura 10 - Configuração do módulo Tank.

Tank

Name: cv

Capacity: 100. Initial Level: 0.0

Regulators:

- cv.Regulator\_in, 2800, Per Hour
- cv.Regulator\_out, 2800, Per Hour
- <End of list>

Use As Packaging Tank

- Packaging Input Connection
- Packaging Output Connection

Animation

Report Statistics

OK Cancel Help

A chegada do material está ligada diretamente na lógica que representa a correia. Cada entidade que chega possui uma massa de 150 toneladas que está armazenada no atributo “a\_carga”, em seguida a entidade ocupa através do módulo *Seize Regulator* a calha virtual da correia definida no módulo *Tank* que será utilizada para adicionar o material na correia. Logo após a entidade segue para o módulo *Flow* onde realmente haverá a transferência de material da calha de entrada para a correia. Na figura 11 observa-se que foi configurado para adicionar material para a correia através do seu *regulator* de entrada, e o fluxo irá ser interrompido assim que transferir a quantidade de material armazenado no atributo “a\_carga”.

Figura 11 - Configuração do módulo Flow para adicionar material.

The image shows a 'Flow' configuration dialog box with the following fields and values:

- Name:** Flow cv
- Type:** Add
- Flow Source/Destination:** (Empty)
- Destination Regulator Type:** Regulator
- Regulator Name:** cv.Regulator\_in
- Stop Flow After:**
  - Quantity:** a\_carga
  - Time:** (Empty)
  - Units:** Hours
  - Signal Value:** (Empty)
- Priority:** Medium(2)
- Allocation:** Value Added
- Quantity Save Attribute:** (Empty)

Buttons: OK, Cancel, Help

Após transferir a quantidade de material armazenado no atributo, a entidade desocupa o *regulator* de entrada da correia pelo módulo *Release Regulator*, e segue para um *dispose*.

Em uma lógica paralela o material será retirado da correia através do seu *regulator* de saída. Uma entidade de controle de fluxo de saída será criada, ocupará o *regulator* de saída, em seguida passará pelo módulo *Flow*. O módulo *Flow* foi configurado de tal forma que este retira material da correia através do *regulator* de saída em uma quantidade limite de 150 toneladas (figura 12). Logo após, a entidade desocupa o *regulator* de saída da correia e essa refaz o ciclo novamente ocupando o *regulator* de saída, transferindo o material e desocupando o *regulator*. Após o módulo *release*, como observado na figura 13, um módulo *Assign* foi utilizado para verificar a vazão de saída de material e contabilizar a contagem de eventos durante a transferência de material utilizando a variável (*v\_event\_3*), onde a cada passagem de uma entidade é acrescido o valor 1 a variável de contagem.

Figura 12 - Configuração do módulo Flow para remover material.

Flow

Name: Flow Type: Remove

Flow Source/Destination

Source Regulator Type: Regulator Regulator Name: cv.Regulator\_out

Stop Flow After

Quantity: 150

Time: Units: Hours

Signal Value:

Priority: Medium(2) Allocation: Value Added

Quantity Save Attribute: a\_remove

OK Cancel Help

Figura 13 - Módulo Assign.

Assign

Name: Assign 2

Assignments:

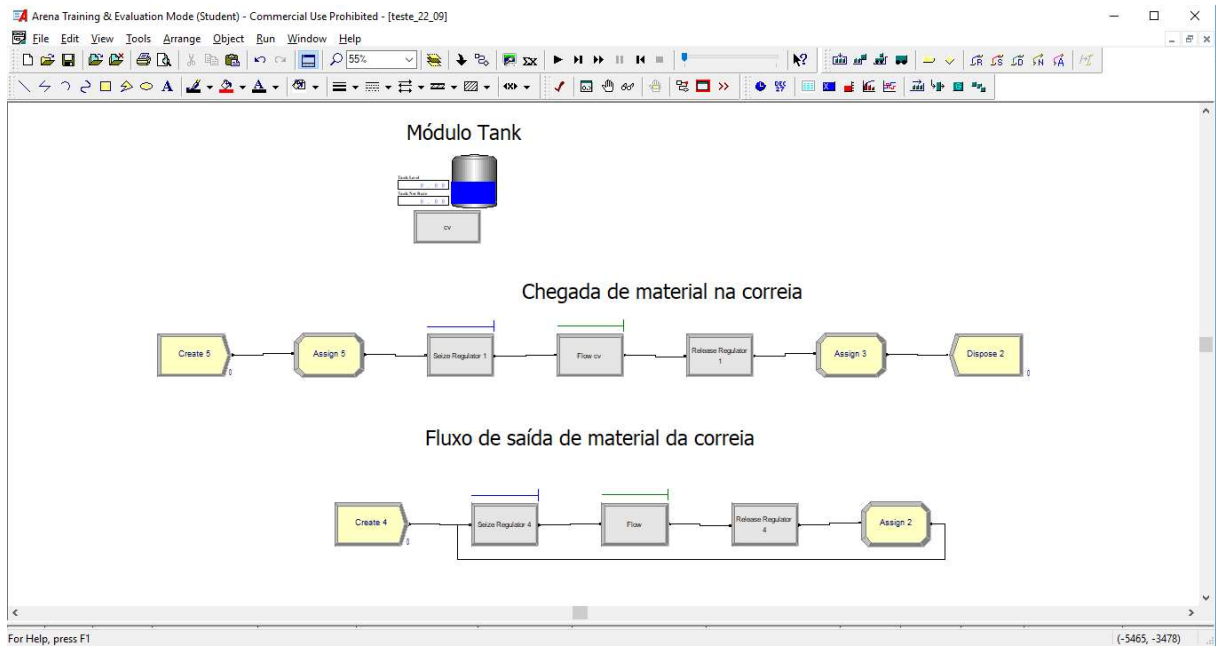
- Variable, v\_pilha, v\_pilha+a\_remove
- Variable, v\_event\_3, v\_event\_3+1
- <End of list>

Add... Edit... Delete

OK Cancel Help

Na figura 14 observa-se o modelo construído com os módulos do *template Flow Process*.

Figura 14 - Visão geral do modelo usando o template Flow Process.

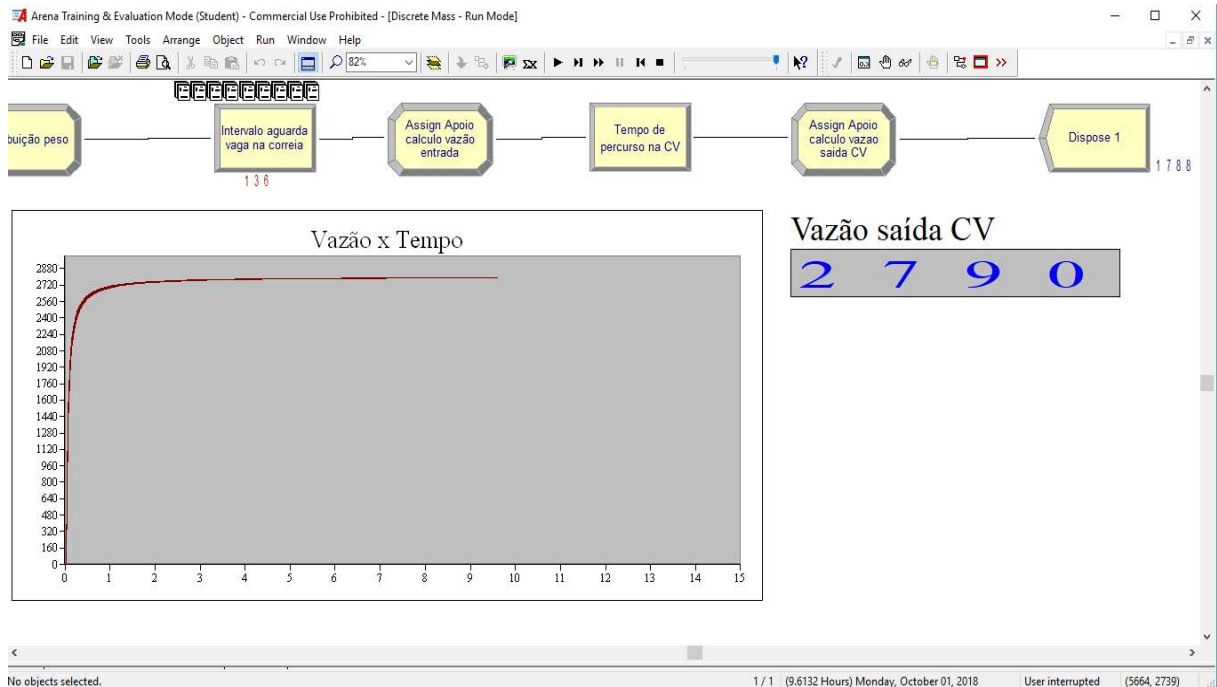


## 5 RESULTADOS

Na discretização por massa observou-se que o material entra no sistema e segue em frente preservando a entidade discretizada com suas características, em um percurso linear. Dessa forma poderia facilmente guardar atributos essenciais para uma análise mais operacional do sistema simulado, como os teores do minério alimentado na correia em um intervalo de tempo. Além disso, caso seja necessário considerar o comprimento da correia, no caso de um TCLD (Transportador de Correias de Longa Distância), esse tipo de modelagem considera o intervalo de tempo desde a chegada de material no início da correia até o mesmo material alcançar o final.

Em função do deslocamento do material do início até o fim, o sistema demora um certo tempo para entrar em regime permanente, como pode ser observado na figura 15.

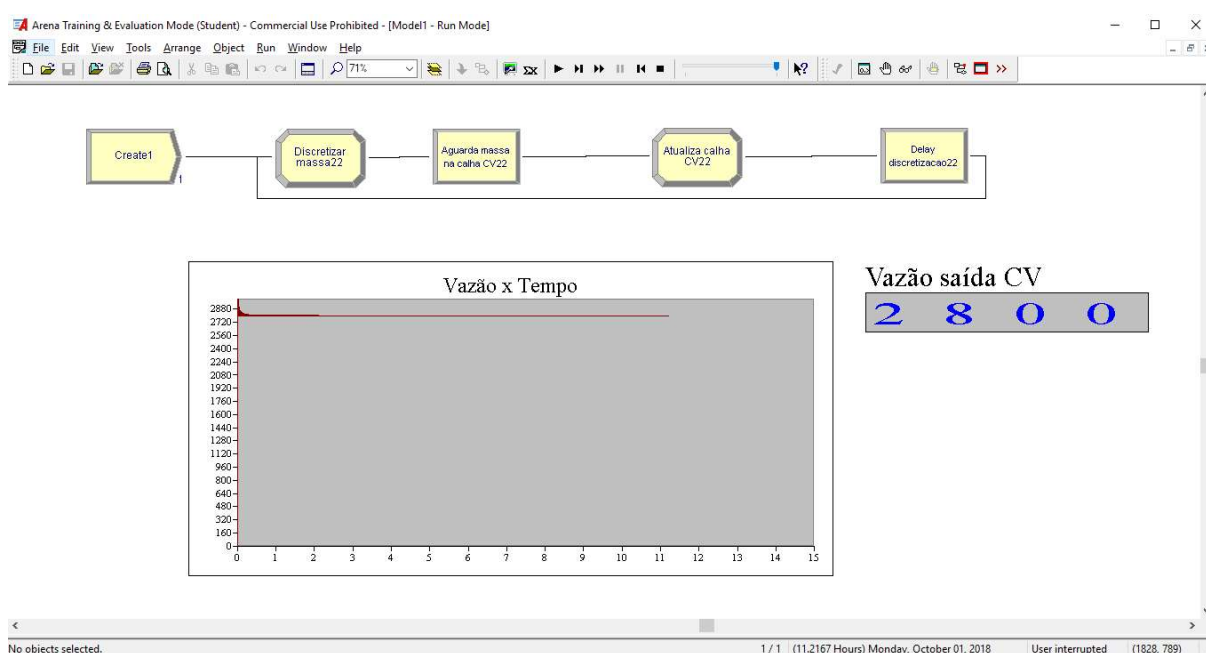
Figura 15 - Modelo e gráfico discretizado por massa.



A figura 15 mostra que a correia simulada, com vazão máxima de 2800 t/h, velocidade de 3 m/s e comprimento de 300 metros, demorou aproximadamente 2 horas para entrar em regime a uma vazão de 2790 t/h, com aderência de 99,6 %.

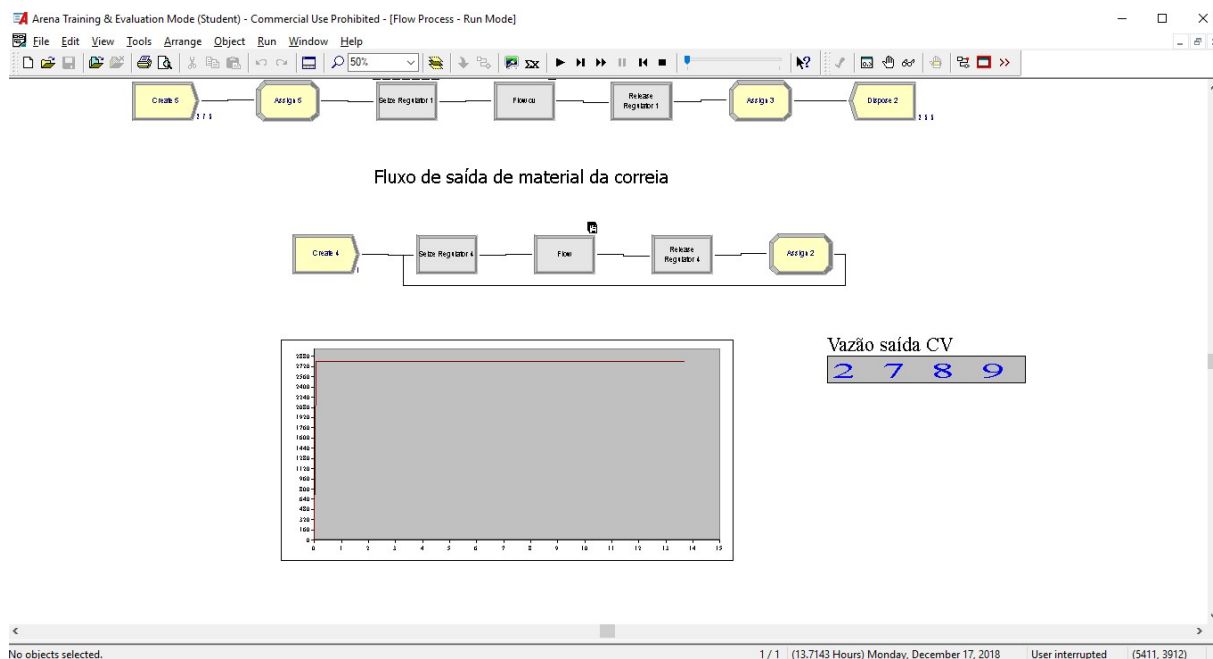
Na discretização por tempo, temos como vantagem um número menor de entidades no sistema, proporcionando uma performance melhor ao rodar o modelo, porém, por esse método construtivo, a entidade não carrega atributos, sendo necessário guardar as possíveis informações de interesse, como teor, antes do material ser discretizado em uma variável. Destaca-se também que, por esse método o comprimento da correia é desconsiderado, ou seja, apenas o fluxo do material é levado em consideração. Observando a figura 16, verifica-se que o sistema entra em regime permanente em poucos instantes logo após haver material disponível na calha do equipamento, além do sistema simular com uma precisão de 100%.

Figura 16 - Modelo e gráfico discretizado por tempo.



Ao utilizar os módulos disponíveis no *template Flow Process*, obteve-se resultado satisfatório como pode ser observado na figura 17.

Figura 17 - Modelo e gráfico usando template Flow Process.



O método tem grande aplicabilidade para processos simples em que se deseja apenas simular o volume do material transferido, deixando de lado características do material.

Outra observação importante quanto ao número de eventos ocorridos no sistema, observando para um horizonte de três horas, o sistema utilizando os módulos do *template Flow Process* mostrou-se mais eficiente ao transferir a mesma quantidade de material em um número bem menor de eventos, como observa-se na tabela 1.

Tabela 1 – Número de eventos por métodos construtivo.

Método Construtivo	Toneladas	Quant. Eventos
Discretização por massa	8295	553
Discretização por tempo	8400	2159
Flow Process	8400	56

## 6 CONCLUSÃO

Após a modelagem, verificou-se através do monitoramento de estatísticas da chegada de material e da saída que os modelos podem representar um sistema de fluxo contínuo sem qualquer perda significativa de aderência de resultados. Essa conclusão foi obtida após verificar que a chegada de material na correia, sendo superior a vazão máxima do equipamento, não fez com que o equipamento transferisse massa maior que a sua capacidade nominal.

Dos três métodos utilizados no estudo, a discretização por massa mostra-se como o método mais versátil e flexível para simular fluxos de sistemas contínuos mais complexos com um viés operacional, podendo agregar situações como de tubulações que recebem mais de um tipo de material ao mesmo tempo. A discretização por tempo e o uso dos módulos do *template Flow Process* podem ser utilizados quando se deseja ter um olhar mais estratégico do sistema sem considerar detalhes como a característica do material transportado tais como teor, densidade, etc.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, Eduardo. **Métodos Numéricos para Simulação na Engenharia**. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodos-numericos-para-simulacao-na-engenharia/>>. Acesso em: 17 agosto 2018.

FREITAS, Paulo. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**, Visual Books Editora, Florianópolis 2008.

FIORONI et al. **Simulation of Continuous Behavior Using Discrete Tools: Ore Transport**, Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference.

HOWARD, Eric. **Optimizing the Smart Factory**. Disponível em:<<https://www.simio.com/blog/2017/09/11/optimizing-smart-factory/>>. Acesso em: 31 julho 2017.

INGLE, Dan. **Analytics: O que é e qual sua importância**. Disponível em: <[https://www.sas.com/pt\\_br/insights/analytics/analytics.html](https://www.sas.com/pt_br/insights/analytics/analytics.html)> Acesso em: 05 de junho 2018.

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 julho 2018.

RESENDE, André Luiz Tenorio. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

## APÊNDICE

$$D_m = \frac{\text{Vazão}}{\text{Velocidade}} = \frac{2800}{3 * 3600} = 0,26 \text{ t/m}$$

$$T_1 = \frac{L_e}{V_c}$$

$$L_e = \frac{M_e}{D_m} = \frac{15}{0,26} = 57,7 \text{ m}$$

$$T_1 = \frac{57,7}{3} = 19,3 \text{ s}$$

$$T_2 = \frac{L_c + L_e}{V_c} = \frac{300 + 57,7}{3} = 119,28 \text{ s}$$

Sendo:

$D_m$  = Densidade mássica linear

$T_1$  = Tempo para que uma entidade libere espaço na correia

$T_2$  = Tempo para a entidade percorrer a correia

$L_e$  = Comprimento que a entidade ocupa na correia

$L_c$  = Comprimento da correia

$V_c$  = Velocidade da correia

Certifico que o aluno Marcos Paulo Salomão Paracampos, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado Métodos para modelagem de sistemas contínuos presentes em uma planta de processamento de minério usando software *Arena Simulation*, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

Orientador

Ouro Preto, 19 de agosto de 2018.