

UNIVERSIDADE FEDEL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ROBSON JACINTO COELHO

**MODELO DE SIMULAÇÃO OPERACIONAL DO MANUSEIO DE
MATÉRIAS-PRIMAS DE UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA**

**JOÃO PESSOA - PB
2011**

ROBSON JACINTO COELHO

**MODELO DE SIMULAÇÃO OPERACIONAL DO MANUSEIO DE
MATÉRIAS-PRIMAS DE UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA**

Dissertação submetida à apreciação da banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: **Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva**

Área de concentração: **Gestão da Produção**

JOÃO PESSOA - PB
2011

C650m Coelho, Robson Jacinto

Modelo de simulação operacional do manuseio de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada / Robson Jacinto Coelho - João Pessoa, 2011.

168f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) PPGEF / Centro de Tecnologia / Campus I / Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

1.Simulação Operacional 2. Manuseio de Matérias-Primas
3.Usina Siderúrgica Integrada. Título.

CDU: 004.8:658.5 (043)

ROBSON JACINTO COELHO

**MODELO DE SIMULAÇÃO OPERACIONAL DO MANUSEIO DE
MATÉRIAS-PRIMAS DE UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA**

Dissertação julgada e aprovada em 15 agosto de 2011 como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva
Universidade Federal da Paraíba
Orientador

Prof. Dr. Marcio Botelho da Fonseca Lima
Universidade Federal da Paraíba
Examinador

Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva
Universidade Federal da Paraíba
Examinador

DEDICATÓRIA

A Deus, luz do meu caminho, por me dar saúde e forças para superar mais este desafio e por me ajudar a subir mais um degrau em minha caminhada.

À minha esposa, Paula Denise, e aos meus filhos, Anna Júlia e Matheus, amores da minha vida, que se abdicaram da minha presença para que eu pudesse realizar mais este sonho.

Aos meus pais, Geraldo e Maria, e aos meus irmãos, que me incentivam e me dão forças para que eu possa alcançar os meus objetivos.

A vocês eu dedico esta vitória.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva, pelo apoio e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos engenheiros e amigos Adriano César Silva, Benedito Pedro Costhek, Claudio Souza Bortolote, Ricardo Baeta Santos e Takeo Fugiwara Santos pelo apoio e colaboração.

Aos engenheiros da área de Redução da ArcelorMittal Tubarão Edson Luis M. Harano, João Bosco Mendes, Paula Fernandes Lana pelo apoio e colaboração.

Aos engenheiros Daniel de Oliveira Mota e Marcelo Moretti Fioroni pelas contribuições na realização deste trabalho.

Aos amigos da Divisão de Engenharia de Produção da ArcelorMittal Tubarão pelo apoio e colaboração.

Ao Prof. Dr. Marcio Botelho da Fonseca Lima, pela colaboração.

Ao Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva, pela colaboração.

À ArcelorMittal Tubarão, por disponibilizar os recursos para que este trabalho fosse realizado.

A todos que de alguma forma colaboraram para realização deste trabalho o meu muito obrigado.

RESUMO

O objetivo principal desta dissertação é construir um modelo de simulação operacional do manuseio de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada, contemplando as operações de recebimento, descarga, estocagem, manuseio e abastecimento das diversas matérias-primas pertinentes ao processo produtivo, com foco operacional, visando auxiliar a tomada de decisões operacionais da equipe que controla o pátio. A construção desse modelo computacional se baseou na estrutura metodológica desenvolvida por Coelho, que passou pela formulação do problema, planejamento do estudo e pela elaboração de uma especificação detalhada do modelo. O modelo de simulação operacional revelou que grande parte dos conceitos válidos para simulações com foco estratégico não representa tanta relevância sob o ponto de vista operacional. Mas a vantagem do modelo de simulação operacional é a ausência de aleatoriedade, não é estocástico, mas sim determinístico. A metodologia inédita, utilizada para desenvolvimento do modelo do pátio de matérias-primas, permitiu a elaboração do modelo com o mínimo de retrabalho e com grande consistência. Os resultados dos cenários, com paradas programadas dos equipamentos, mostraram a flexibilidade do simulador, permitindo a identificação prévia de gargalos e possibilitando a tomada de ações corretivas para evitá-los nas situações reais. O preenchimento do mapa do pátio, a partir de resultados de cenários consistentes, foi um grande avanço, no sentido de automatizar esta atividade. O comportamento correto do simulador permitiu que a equipe do pátio de matérias-primas considerasse o estudo muito bem sucedido.

Palavras-chave: Simulação Operacional. Manuseio de Matérias-Primas. Usina Siderúrgica Integrada.

ABSTRACT

The main goal of this dissertation is to design and implementation of an Operational Simulation Model (OSM) of the handling of raw material in an Integrated Steelmaking Plant, considering operations of receiving, unloading, stocking, handling and supplying the different raw materials related to the production process with an operational perspective. The aim of this focus is to help in the decision making of the team controlling the ore inventory. The construction of this computer model was based on the methodological framework developed by Coelho, which passed through problem formulation, planning and elaboration of a detailed specification of the model. The OSM showed that most of the valid concepts for simulations with a strategic focus do not present relevance from an operational point of view. The advantage of the OSM is the fact that it is not random or stochastic, but deterministic. The methodology allowed the model elaboration with a minimum effort and great consistency. The results of scenarios with scheduled equipment stops have shown the simulator's flexibility, with previous identification of bottlenecks and allowed the decision making of corrective actions for avoid them on real situations. The filling of the stockyard map using results of consistent scenarios was a great advance in order to automate this activity. The correct behaviour of the simulator allowed the raw material yard team to consider the well succeeded study.

Keywords: *Operational Simulation. Raw Material Handling. Integrated Steelmaking Plant.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração da fase de produção de 7,5 M t aço/ ano da AMT, com respectivos volumes.....	19
Figura 2 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos discretos. ..	32
Figura 3 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos contínuos. .	32
Figura 4 – Comportamento de uma variável contínua discretizada no tempo.	33
Figura 5 – Custos dos usuários e da gerência em função do número de postos de atendimento.	36
Figura 6 – Fluxograma dos passos de um estudo de modelagem e simulação.....	44
Figura 7 – Representação contínua x discreta.	51
Figura 8 – Representação contínua real (a) e discreta modelada (b) da chegada do material ao destino comparação entre ambos (c).....	52
Figura 9 – Estrutura hierárquica do Arena.	57
Figura 10 – Fluxograma utilizado para desenvolvimento do modelo de simulação operacional.	65
Figura 11 – Diagrama esquemático do funcionamento do sistema de recebimento de matérias-primas.	72
Figura 12 – Virador de vagões.	72
Figura 13 – <i>Hopper</i> rodo-ferroviário.....	73
Figura 14 – Pátios de matérias-primas.	73
Figura 15 – Sub-modelos do simulador do pátio de matérias-primas.	79
Figura 16 – Recebimento de matérias-primas pelo <i>hopper</i> rodoviário: a) lógica completa do <i>hopper</i> rodoviário, b) e c) trecho da lógica do <i>hopper</i> rodoviário.....	81
Figura 17 – Consumo de matérias-primas oriundas do <i>hopper</i> rodoviário: a) lógica completa de consumo do <i>hopper</i> rodoviário, b) e c) trecho da lógica de consumo do <i>hopper</i> rodoviário.....	83
Figura 18 – Recebimento de matérias-primas pelo <i>hopper</i> ferroviário: a) lógica completa do <i>hopper</i> ferroviário, b) e c) trecho da lógica do <i>hopper</i> ferroviário.....	84
Figura 19 – Lógica de funcionamento do virador de vagões: a) lógica completa do virador, b) e c) trecho da lógica do virador de vagões.	87
Figura 20 – Lógica de funcionamento da correia transportadora de pelotas.....	88

Figura 21 – Lógica de funcionamento das correias transportadoras: a) lógica de correias transportadoras, b), c) e d) trecho da lógica de correias transportadoras.	92
Figura 22 – Lógica de ocupação dos equipamentos.	94
Figura 23 – Lógica de discretização do fluxo contínuo nas correias transportadoras.	95
Figura 24 – Lógica de puxada de matérias-primas do pátio para o AF1.	96
Figura 25 – Lógica de puxada de matérias-primas dos pátios para a blendagem.	97
Figura 26 – Lógica de puxada de matérias-primas dos pátios para a sinterização.	98
Figura 27 – Lógica que verifica a mudança de estado da pilha de matérias-primas.	99
Figura 28 – Lógica de recebimento de matérias-primas dos setores consumidores.	101
Figura 29 – Lógica de recebimento de matérias-primas da blendagem.	102
Figura 30 – Lógica de recebimento de matérias-primas da sinterização.	104
Figura 31 – Trecho da lógica de recebimento de matérias-primas dos pátios primários.	105
Figura 32 – Lógica de recebimento de matérias-primas nos altos-fornos.	106
Figura 33 – Trecho da lógica de recebimento de matérias-primas dos altos-fornos.	107
Figura 34 – Lógica de peneiramento nos altos-fornos.	108
Figura 35 – Lógica de recebimento de matérias-primas da calcinação.	109
Figura 36 – Lógica de recebimento de matérias-primas dos silos de pelotas.	110
Figura 37 – Lógica de recebimento de matérias-primas dos silos de coque.	111
Figura 38 – Lógica de pedido dos silos da blendagem.	114
Figura 39 – Lógica de pedido dos silos da mistura da sinterização.	115
Figura 40 – Lógica de pedido dos silos do AF1.	117
Figura 41 – Lógica de consumo dos silos de pelotas, coque e blendagem.	119
Figura 42 – Lógica de consumo dos silos da sinterização.	120
Figura 43 – Lógica de consumo dos silos dos altos-fornos: a) consumo do AF1, b) consumo do AF2, c) consumo do AF3.	121
Figura 44 – Lógica de consumo dos silos de rejeitos, dos silos de RAF e dos silos de calcário.	122
Figura 45 – Lógica de consumo dos silos da calcinação velha e nova.	123
Figura 46 – Lógica de falhas.	124
Figura 47 – Animação do modelo replicando o visual do sistema supervisório.	135
Figura 48 – Visão geral dos silos do Alto-Forno 1.	136
Figura 49 – Visão geral dos silos do Alto-Forno 2.	136
Figura 50 – Visão geral dos silos do Alto-Forno 3.	137
Figura 51 – Visão geral dos silos finos, calcário e coque.	137

Figura 52 – Visão geral dos silos da blendagem.	138
Figura 53 – Visão geral dos silos de pelotas.	138
Figura 54 – Visão geral dos pátios primários.	139
Figura 55 – Visão geral do surge <i>hopper</i> velho.	139
Figura 56 – Visão geral do surge <i>hopper</i> novo.	140
Figura 57 – Fórmula de cálculo da quantidade de matéria-prima por pilha.	142
Figura 58 – Mapa do pátio de matérias-primas.	144
Figura 59 – Nível dos silos do AF3.	154
Figura 60 – Nível dos silos de recebimento de pelotas.	154
Figura 61 – Utilização do virador de vagões.	155
Figura 62 – Produtividade dos sistemas de correias transportadoras.	155
Figura 63 – Utilização dos equipamentos do sistema.	156
Figura 64 – Fluxo esquemático do simulador.	158
Figura 65 – Navegador principal.	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Paralelo entre o recebimento de matérias-primas das fases de 5,0 Mt/ a e de 7,5 Mt/ a.	20
Tabela 2 – Comparação entre modelos contínuos no tempo e de eventos discretos.	50
Tabela 3 – História do uso da simulação computacional.	53
Tabela 4 - Matérias-primas consideradas no estudo destacadas por classe e subclasse.	76
Tabela 5 – Principais variáveis do sistema de manuseio de matérias-primas.	125
Tabela 6 – Tabela de programação de chegadas de composições de vagões no virador de vagões.	126
Tabela 7 – Tabela de programação de chegadas de composições de vagões do <i>hopper</i> ferroviário.	126
Tabela 8 – Tabela de programação de chegadas de caminhões do <i>hopper</i> rodoviário.	127
Tabela 9 – Tabela de programação de chegadas de pelotas.	127
Tabela 10 – Tabela de programação de chegadas de rejeitos.	127
Tabela 11 – Tabela de programação de envios de fundentes do <i>hopper</i> rodo-ferroviário.	128
Tabela 12 – Configuração dos silos do sistema.	130
Tabela 13 – Programação de paradas dos equipamentos.	131
Tabela 14 – Sistema de cadastro das capacidades das correias transportadoras por tipo de matéria-prima.	132
Tabela 15 – Exemplo de alguns parâmetros do sistema.	132
Tabela 16 – Configuração do pátio de matérias-primas.	133
Tabela 17 – Peneiras do sistema.	134
Tabela 18 – Modelo estático utilizado para validação do modelo dinâmico.	143
Tabela 19 – Paralelo entre as produtividades das correias transportadoras (CT's) do modelo dinâmico, do modelo estático e do sistema real.	147
Tabela 20 – Registro de movimentações, histórico de uso.	150
Tabela 21 – Registro de desempenho do sistema de correias transportadoras, histórico de uso.	151
Tabela 22 – Registro de ocorrências de falta de matéria-prima no alto-forno 3.	152
Tabela 23 – Registro de desempenho dos <i>stackers reclaimers</i> por unidade produtiva.	152
Tabela 24 – Registro de desempenho de todos os equipamentos do sistema.	153

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AF1	Alto-forno 1;
AF2	Alto-forno 2;
AF3	Alto-forno 3;
AMT	ArcelorMittal Tubarão;
CDQ	<i>Coke Dry Quenching</i> ;
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão;
CT's	Correias Transportadoras;
<i>FIFO</i>	Disciplina de atendimento <i>first in – first out</i> ;
LTQ	Laminador de Tiras a Quente;
MSO	Modelo de Simulação Operacional;
Mt/ a	Milhões de toneladas por ano;
RAF	Retorno de Alto-Forno;
SH	<i>Surge Hopper</i> ;
SHN	<i>Surge Hopper</i> Novo;
SR's	<i>Stackers Reclaimers</i> ;
SR1	<i>Stacker Reclaimer</i> 1;
SR2	<i>Stacker Reclaimer</i> 2;
SR3	<i>Stacker Reclaimer</i> 3;
TRT	Turbina de Recuperação de Topo.

LISTA DE SÍMBOLOS

Kcal	Quilocaloria;
m^3	Metro cúbico;
$t/ d/ m^2$	Produtividade da sinterização em toneladas/ dia/ metro quadrado;
t_0	Instante de tempo de início de operação do processo;
t^*	Instante de tempo no qual o processo entra no regime estacionário;
U	Fator de utilização (porcentagem de tempo que todos os serviços estão ocupados);
P_0	Probabilidade de não haver elementos no sistema;
L	Número médio de usuários no sistema;
L_q	Número médio de usuários na fila esperando pelo serviço;
T	Tempo de permanência de um usuário qualquer no sistema;
T_q	Tempo de um usuário qualquer na fila;
W	Tempo de permanência de um usuário qualquer no sistema;
W_q	Tempo médio de espera de um usuário qualquer na fila;
P_w	Probabilidade de que um elemento de chegada tenha que esperar por serviço;
P_n	Probabilidade de n clientes no sistema;
λ	Taxa de chegadas;
μ	Taxa de atendimento;
σ	Desvio padrão.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	17
1.1 O PROBLEMA	18
1.2 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	21
1.3 DELIMITAÇÕES E PREMISSAS DO ESTUDO	22
1.3.1 PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO.....	23
1.3.2 RESULTADOS DO MODELO	24
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 OBJETIVO GERAL.....	24
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
 CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 26
2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	26
2.1.2 CONCEITOS BÁSICOS DE SIMULAÇÃO.....	28
2.1.2.1 SISTEMAS	28
2.1.2.2 MODELOS.....	30
2.1.2.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO	31
2.1.2.4 TERMINOLOGIA BÁSICA UTILIZADA EM SIMULAÇÃO	33
2.1.2.5 TEORIA DAS FILAS.....	35
2.1.2.5.1 MODELO M/ M/ s	39
2.1.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO	40
2.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO	42
2.2.1 MÉTODOS DE MODELAGEM SEGUNDO DIFERENTES VISÕES DE SISTEMAS	42
2.2.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO.....	43
2.3 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS.....	47
2.4 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	52
2.4.2 O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ARENA.....	55
2.5 APLICAÇÕES DE SIMULAÇÃO NO SETOR SIDERÚRGICO	57

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	64
3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E PLANEJAMENTO DO ESTUDO	66
3.2 ELABORAÇÃO DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DETALHADA DO MODELO	66
3.3 FLUXOGRAMA LÓGICO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	66
3.4 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	67
3.5 DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	68
3.6 CONSTRUÇÃO DO MAPA DO PÁTIO	68
3.7 DESENVOLVIMENTO DO MODELO	68
3.8 SIMULAR, VERIFICAR E VALIDAR O MODELO DE SIMULAÇÃO OPERACIONAL.....	69
3.9 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS GERADOS	69
3.10 APRESENTAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	70
 CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DO SISTEMA DE MANUSEIO DE MATÉRIAS-PRIMAS	71
4.1 SISTEMA DE RECEBIMENTO, ARMAZENAGEM E MANUSEIO DE MATÉRIAS-PRIMAS.....	71
4.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE MANUSEIO DE MATÉRIAS-PRIMAS	78
4.2.1 SUB-MODELOS DO PÁTIO DE MATÉRIAS-PRIMAS	79
4.2.1.1 ELEMENTOS GERADORES	80
4.2.1.2 GERADORES DE TRANSPORTE	80
4.2.1.1.1 LÓGICA DE CORREIAS TRANSPORTADORAS	89
4.2.1.1.2 LÓGICA DE PUXADA DO PÁTIO.....	95
4.2.1.2 ELEMENTOS CONSUMIDORES	100
4.2.1.3 ELEMENTOS ARMAZENADORES	111
4.2.1.3.1 LÓGICA DE PEDIDO DE SILOS	112
4.2.1.3.2 LÓGICA DE CONSUMO DE SILOS.....	118
4.2.1.4 FALHAS.....	123
4.2.1.5 VARIÁVEIS.....	124
4.2.2 INTERFACE DO MODELO	125
4.2.3 ANIMAÇÃO DO MODELO DO PÁTIO DE MATÉRIAS-PRIMAS.....	134
4.3 MODELAGEM ESTÁTICA DO PÁTIO DE MATÉRIAS-PRIMAS	140

4.4	SIMULAR, VERIFICAR E VALIDAR O MODELO DE SIMULAÇÃO OPERACIONAL.....	145
CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....		149
CAPÍTULO 6 - IMPLEMENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....		157
6.1	MANUAL DE OPERAÇÃO DO PÁTIO DE MATÉRIAS-PRIMAS.....	157
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....		162
7.1	CONCLUSÃO	162
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	163
REFERÊNCIAS.....		164
ANEXO A: EXEMPLO DE ROTAS DO SISTEMA DE RECEBIMENTO DE MATÉRIAS-PRIMAS.....		168

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A área de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada¹ corresponde à etapa inicial de um ciclo produtivo, cujo produto final é o aço. Neste contexto, a área de recebimento deve funcionar garantindo o suprimento destas matérias-primas em qualidade, operacionalidade e custo. Podemos dizer que a qualidade e custo do produto final estão intimamente ligados à etapa inicial do processo. Em todos os processos dependentes de matéria-prima, o seu abastecimento é motivo de grande atenção por parte das equipes responsáveis. Este aspecto da produção assume importância crescente, principalmente, se observados os investimentos envolvidos e o custo da operação. Este é o caso dos processos siderúrgicos, em especial a produção de ferro gusa, onde o desabastecimento de materiais penaliza fortemente a empresa, seja na forma de perda de produção, seja na forma (muito mais grave) de perda de equipamentos/ instalações.

Face às exigências de mercado, as empresas estão reconhecendo a necessidade de ganhar ou manter vantagem competitiva, e para isso fatores como cumprimento de datas de entrega, redução dos custos de produção, aumento da flexibilidade, redução dos prazos de atendimento, aumento da flexibilidade, sem perda dos padrões de qualidade, devem ser monitorados. A dinâmica dos sistemas de manufatura e serviço, em face dessas exigências, é complexa e de difícil tratamento analítico. A complexidade aumenta ainda mais quando se observa que cada sistema apresenta uma arquitetura peculiar. Com isso a modelagem matemática e de simulação aparecem como poderosas ferramentas de análise. Uma destas técnicas é a simulação de eventos discretos que será utilizada na construção do modelo. Este estudo é de extrema relevância para o setor siderúrgico por se tratar do manuseio e abastecimento das diversas matérias-primas do processo produtivo de uma usina siderúrgica integrada.

Neste trabalho propõe-se a construção de um modelo de simulação operacional do manuseio de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada, contemplando as operações de recebimento, descarga, estocagem, manuseio e abastecimento das diversas matérias-primas pertinentes ao processo produtivo, com foco operacional, visando auxiliar a tomada de decisões operacionais da equipe que controla o pátio, permitindo visualizar o futuro imediato dos eventos do processo.

¹ **Usina siderúrgica integrada** é aquela que opera as três fases básicas do processo siderúrgico: redução, refino e laminação. O processo se inicia na redução onde as matérias-primas (minério, coque, fundentes etc) são liquefeitas e transformadas em ferro gusa, passa pela transformação do ferro gusa em aço no refino e termina na laminação, onde o aço é deformado mecanicamente e transformado em produto acabado ou semi-acabado.

1.1 O PROBLEMA

A usina siderúrgica integrada em estudo é a ArcelorMittal Tubarão (AMT), anteriormente denominada Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), que iniciou sua produção em novembro de 1983, com uma capacidade de produção de placas de aço de 3,0 milhões de toneladas por ano (Mt/ ano) e está estrategicamente localizada em uma área de 14 Km² na ponta de Tubarão em Vitória, Espírito Santo, sendo servida por uma completa infraestrutura de transporte e logística, formada por malha rodo-ferroviária e um complexo portuário.

Foi privatizada em 1992 e desde então vem passando por um intenso programa de investimentos. Em 1998 sua capacidade anual de produção de placas foi expandida para 4,5 Mt/ano e, em 2002, foi implantado um Laminador de Tiras a Quente (LTQ) com capacidade anual de 2,0 milhões de toneladas. Com isso, parte da produção de placas deixou de ser ofertada ao mercado, dando lugar às Bobinas a Quente, produto de maior valor agregado. Em 2004 houve a otimização da produção para 5,0 Mt/ ano (placas e bobinas), com investimentos em melhorias de várias etapas do processo.

Em 2007 a empresa passou por uma nova expansão, que elevou a capacidade de produção de 5,0 Mt/ a para 7,5 Mt/ a (placas e bobinas). O aumento de cinquenta por cento da capacidade de produção exerceu influência em todos os principais equipamentos e processos produtivos da AMT. Na área de redução, foco deste estudo, onde acontece a redução da carga metálica² direta e indiretamente em ferro gusa³, as principais alterações foram:

- Construção do terceiro alto-forno⁴ com capacidade de produção de ferro gusa de 3,0 Mt/a;
- Ampliação do sistema de recebimento de matérias-primas;
- Construção de baterias para produção de coque, com tecnologia *Heat Recovery*⁵, com capacidade de produção de 1,55 Mt/ a;
- Aumento de produtividade da Sinterização⁶ de 34 para 42 t/ d/ m².

² **Carga metálica** é composta por minério de ferro granulado e/ ou sinter e/ ou pelota.

³ **Ferro gusa** é uma liga de ferro e carbono (Fe-C) com alto teor de carbono, sendo o teor de carbono na liga maior que 4%.

⁴ **Alto-forno** é um reator metalúrgico utilizado para produção de ferro gusa, a matéria-prima para fabricação do aço

⁵ **Heat Recovery** é uma tecnologia desenvolvida objetivando produção de coque por mineradoras de carvão, que recupera o calor dos gases queimados, gerando energia elétrica.

A **Figura 1** apresenta a configuração atual da ArcelorMittal Tubarão, com a indicação de volumes das principais matérias-primas consumidas em cada setor produtivo para se atingir a meta de produção de 7,5 Mt/ a de produto acabado (placas de aço e bobinas laminadas a quente). Pode-se observar na Figura 1 que as usinas siderúrgicas integradas processam um grande volume de matérias-primas para produzir o aço.

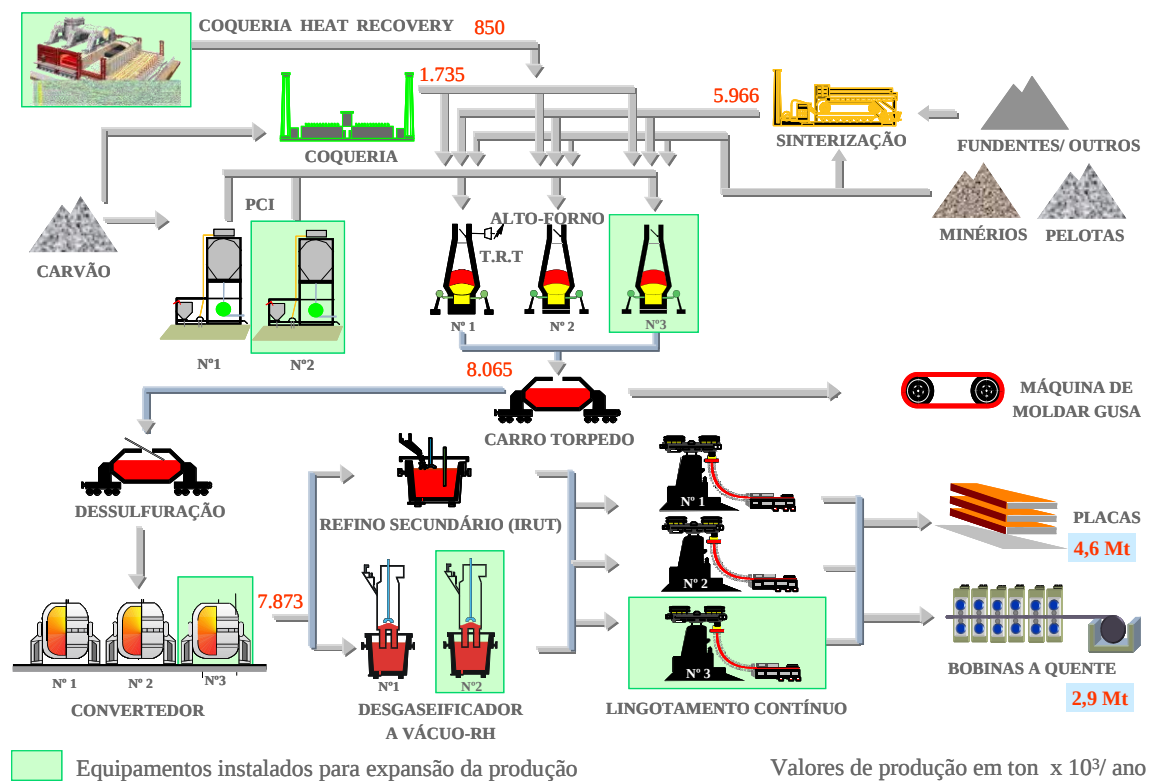


Figura 1 – Configuração da fase de produção de 7,5 M t aço/ ano da AMT, com respectivos volumes.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão.

A **Tabela 1** mostra um paralelo entre o recebimento de matérias-primas do 5,0 Mt/ ano e do 7,5 Mt/ ano. Onde se pode observar um recebimento de matérias-primas adicionais da ordem de 5,8 Mt/ ano.

⁶ **Sinterização** é um processo de aglomeração a quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições, com dosagens e composições químicas definidas, cujo produto resultante, o sinter, apresenta características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno.

Tabela 1 – Paralelo entre o recebimento de matérias-primas das fases de 5,0 Mt/ a e de 7,5 Mt/ a.

Fonte: Plano Empresarial da AMT 2007/ 2009 e Sinterização com produtividade de 42 t/d/m².

Matéria-Prima	Unidade	5,0 Mt/ ano	7,5Mt/ ano	Diferença
Minério Fino	(t/a)	4.395.252	5.165.734	770.482
Minério Granulado	(t/a)	1.154.834	1.741.735	586.902
Pelota via Virador de Vagões	(t/a)	1.863.553	-	(1.863.553)
Pelota via correia transportadora da VALE	(t/a)	-	5.200.000	5.200.000
Calcário Fino	(t/a)	806.520	1.091.904	285.384
Calcário Granulado	(t/a)	633.400	1.457.436	824.036
Total	(t/a)	8.853.559	14.656.809	5.803.250

Em função do recebimento adicional de matérias-primas para atender a expansão da AMT, constatou-se que não há disponibilidade da VALE (companhia de mineração, fornecedora de minério de ferro e pelotas) para atender à demanda adicional, dentro do sincronismo necessário para a operação segura e estável da planta. Em face a este cenário, faz-se necessário avaliar os impactos decorrentes do recebimento e manuseio do volume adicional de matérias-primas a ser recebido via sistema: virador de vagões⁷, *hopper* rodoferroviário⁸ e correias transportadoras que ligam a VALE à AMT, dentro daquele sincronismo necessário para a operação estável da AMT.

Portanto, torna-se necessário apresentar alternativas de recebimento de matérias-primas na área da AMT, indicando as conseqüências em cada uma das alternativas. Neste contexto, o presente trabalho propõe a modelagem do sistema de manuseio de matérias-primas da AMT, uma usina siderúrgica integrada, contemplando as operações de recebimento, descarga, estocagem, manuseio e abastecimento das diversas matérias-primas pertinentes ao processo produtivo, visando auxiliar a tomada de decisões operacionais da equipe que controla o pátio, permitindo visualizar o futuro imediato dos eventos do processo.

O simulador operacional auxiliará na elaboração de uma programação mais consistente do recebimento e manuseio de matérias-primas, o que se refletirá no aumento da disponibilidade das máquinas móveis e contribuirá para a estabilidade do sistema de recebimento, manuseio e abastecimento de matérias-primas.

⁷ **Virador de vagões** é um equipamento responsável pelo recebimento de matérias-primas através do modal ferroviário, onde faz-se o descarregamento da matéria-prima simplesmente virando o vagão na baía de descarga.

⁸ **Hopper rodoferroviário** são tremonhas (silos) subterrâneas para recebimento de matérias-primas, e no caso da AMT o recebimento pode ser realizado pelos modais rodoviário e ferroviário.

1.2 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Por simulação, entende-se uma imitação de parte da realidade em uma escala menor, sujeita às mesmas leis físicas e operacionais que o sistema real, com a finalidade de testar alternativas e estudar seu comportamento. Tal imitação é denominada “modelo”. A simulação de modelos foi amplamente utilizada, por exemplo, pela indústria aeronáutica, que testava a aerodinâmica de novos projetos em túneis de vento.

A Simulação Computacional transporta esse conceito para o campo da informática, tornando o computador uma espécie de “túnel de vento” virtual, onde se pode testar protótipos e obter informações detalhadas sobre seu comportamento de forma extremamente cômoda e barata. Com o advento das inovações tecnológicas, o uso de *softwares* na área de simulação tem se tornado cada vez mais amplo.

Tais ambientes computacionais permitem que se “descreva” o funcionamento do processo, agregando a este uma parte gráfica que apresenta visualmente o comportamento da simulação. Usando a simulação, é possível reproduzir dinamicamente o comportamento do sistema, detectar os eventuais problemas e corrigi-los ainda na fase de projeto, além de permitir testar estratégias de operação e treinar as equipes envolvidas no processo.

O software de simulação Arena tem sido amplamente utilizado para simulação de sistemas, tanto no meio empresarial como no científico, sendo os sistemas, na maioria das vezes, discretos no tempo. Nestes sistemas, os valores assumidos pelas variáveis se alteram em instantes específicos, associados à ocorrência de eventos no sistema. Como exemplos podem-se citar os sistemas de filas e o evento de chegada de um cliente.

Desta forma, propõe-se a utilização do software Arena para a construção de um simulador operacional do pátio de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada, que não pode ser considerado uma ferramenta de inteligência artificial ou um programador de produção. Este modelo consiste na representação lógica com fidelidade do sistema existente, sem, entretanto, incluir todos os inúmeros comportamentos não padronizados e personalizados que caracterizam uma operação no mundo real. Assim, o modelo representará todos os comportamentos modelados, sendo incapaz de reproduzir o pensamento do ser humano. Todas as políticas de decisão conhecidas deverão ser documentadas e modeladas, a fim de que o modelo possa ter grande fidelidade.

A simulação do manuseio de matérias-primas trará inúmeros benefícios para a área de recebimento e manuseio de matérias-primas, pois será possível controlar e observar o comportamento de todo o sistema e variar os parâmetros operacionais, tais como:

produtividade dos sistemas de correias transportadoras, produtividade das máquinas móveis e volumes de recebimento de matérias-primas, entre outros. Esta experimentação conduz a um maior entendimento da dinâmica do sistema e, conseqüentemente, a ajustes de parâmetros mais adequados, capazes de tornar a programação de manuseio de matérias-primas mais eficiente. Além dos benefícios operacionais, que podem ser obtidos através da análise de desempenho deste sistema, e da gestão unificada com a utilização do modelo para tomada de decisão, somam-se os ganhos de estabilidade da produção advindos da programação acertada do manuseio de matérias-primas, e redução nos níveis de queda de matérias-primas ao longo das correias transportadoras, conseqüentemente reduzindo os níveis de emissão de particulados.

Este modelo pode ser adaptado e aplicado em qualquer usina siderúrgica integrada, ou em outro segmento que envolva o manuseio de matérias-primas.

1.3 DELIMITAÇÕES E PREMISSAS DO ESTUDO

O sistema em estudo é constituído por três elementos principais, a saber:

- Recebimento de matéria-prima externa, através de um virador de vagões, um *hopper* rodoferroviário, e uma correia transportadora que liga a ArcelorMittal Tubarão, usina siderúrgica integrada em estudo, diretamente à VALE, companhia de mineração;
- Armazenagem dos materiais recebidos em seis pátios, quatro dos quais dedicados a matérias-primas diversas, e dois dedicados a material blendado (mistura de outros materiais);
- Processadores de matéria-prima, que consomem determinados materiais e os convertem em outros, para uso em outra parte do sistema (sinterização, blendagem);
- Consumidores de matérias-primas, que apenas consomem materiais (altos-fornos, calcinação).

A interligação entre esses setores é feita através de um sistema de correias transportadoras, capaz de levar os materiais de seus pontos de origem até o destino, seja para armazenagem ou consumo. As correias do sistema atuam em conjunto levando os materiais, formando rotas de transporte.

Dentre as matérias-primas consideradas neste estudo podem-se citar: minério de ferro fino, minério de ferro grosso, pelota, retorno de alto-forno (RAF), sinter, degradado, blendado, rejeito, *small coke*, coque fino, calcário fino, calcário bitolado, dunito e quartzo.

Usando simulação, é possível reproduzir dinamicamente o comportamento do sistema, detectar os eventuais problemas e corrigi-los, além de permitir testar estratégias de operação e treinar as equipes envolvidas no processo. Essas características se alinham com os objetivos procurados pela ArcelorMittal Tubarão, no estudo do novo sistema de manuseio de matérias-primas, fato que contribuiu para sua escolha neste caso.

1.3.1 Parâmetros de entrada do modelo

Os itens parametrizados para o desenvolvimento do modelo de simulação operacional do pátio de matérias-primas são apresentados a seguir:

- **Sistemas:** capacidades das correias transportadoras, relacionando as diversas matérias-primas com os sistemas de correias transportadoras a serem utilizados;
- **Parâmetros:** informações sobre tempos de descarregamento e rendimento das diversas matérias-primas manuseadas no sistema;
- **Pátio:** informações sobre o volume de matérias-primas armazenado em cada pátio, separado por “baliza” (baliza é a distância entre dois pontos consecutivos no pátio igual a 5m), contemplando o ângulo de armazenamento de cada material, o tipo de matéria-prima, o *status* de da pilha se em formação ou consumo, bem como a forma de armazenagem se por *stacker reclaimer* ou caminhão;
- **Silos:** parâmetros para configuração individualizada de cada silo do sistema, com informações sobre dimensões físicas do silo, taxa de consumo, níveis em termos percentuais e tamanhos dos lotes enviados;
- **Paradas:** controle de falhas dos equipamentos, onde é definido se o equipamento irá sofrer falhas e, caso afirmativo, qual o horário de início e término da falha;
- **Peneiras:** entrada de dados de percentual degradados e rejeitos relativos às peneiras dos sistemas;
- **Chegadas:** programação de chegadas de matérias-primas;
- **Envios:** programação de envios de matérias-primas do *hopper* rodo-ferroviário para o sistema;

1.3.2 Resultados do modelo

Os resultados fornecidos pelo modelo de simulação operacional do pátio de matérias-primas são apresentados a seguir:

- **Desempenho dos *stackers reclaimers* (SR's):** planilha de resultados de desempenho dos SR's relacionados com os diversos destinos possíveis;
- **Histórico de uso:** registros de utilização dos equipamentos no sistema, bem com ocorrência de falta de produtos;
- **Utilização:** apresenta as informações de utilização das correias transportadoras com informações de peso transportado, tempo de operação, percentual de tempo do sistema utilizado, e produtividade do sistema em tonelada por hora;
- **Mapa do pátio:** gera de forma esquemática, em planilha excel, o mapa dos pátios de matérias-primas com base no recebimento e consumo de matérias-primas do sistema;
- **Gráficos:** consolidação das informações do modelo apresentadas de maneira gráfica.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Construir um modelo de simulação operacional do manuseio de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada.

1.4.2 Objetivos específicos

- Elaborar uma metodologia que permita o desenvolvimento do modelo de simulação operacional com consistência e com o mínimo de retrabalho.
- Simular cenários que permitam ganhos em termos de estabilidade operacional, advindos da programação acertada do manuseio, estocagem e abastecimento de matérias-primas.
- Avaliar a capacidade efetiva do sistema de recebimento, estocagem, manuseio e abastecimento de matérias-primas para os setores consumidores, identificando possíveis gargalos do processo produtivo.

- Servir como suporte ao planejamento do recebimento, manuseio e abastecimento de matérias-primas para os setores consumidores, contribuindo para a gestão unificada dos pátios primários com a utilização do modelo para tomada de decisão.
- Construir de forma esquemática o mapa dos pátios de matérias-primas com base nas entradas e saídas de matérias-primas do sistema.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

A competitividade entre empresas no mundo contemporâneo tem gerado uma crescente demanda pela utilização de ferramentas de apoio à solução de problemas e ao aperfeiçoamento de seus sistemas produtivos. A realização de testes empíricos, em geral, apresenta grande complexidade, o que inviabiliza o uso de métodos puramente analíticos. A simulação constitui uma técnica capaz de estudar tais sistemas, representando-os através de modelos lógico-matemáticos e da utilização do computador para experimentá-los numericamente. Usando simulação, é possível reproduzir dinamicamente o comportamento do sistema, detectar os eventuais problemas e corrigi-los ainda na fase de projeto, além de permitir testar estratégias de operação e treinar as equipes envolvidas no processo.

Segundo Shannon (1998), a simulação compreende, além da construção de um modelo, um método experimental que pode ser utilizado em diversas situações:

- Descrever e explicar o comportamento do sistema;
- Construir teorias ou hipóteses baseadas nas observações realizadas;
- Aumentar o desempenho do sistema;
- Projetar novos sistemas com o desempenho desejado;
- Utilizar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou em seus métodos de operação.

Segundo Freitas (2001), o uso da simulação pode ser adequado a diversas situações, tais como:

- Não existe formulação matemática completa para o problema;
- Não há um método analítico que resolva o modelo matemático;
- A obtenção de resultados com o modelo é mais fácil através da simulação do que por métodos analíticos;
- Não é possível ou é muito difícil a experimentação com o sistema real;
- A experimentação com o sistema real é muito dispendiosa;
- O sistema real ainda não existe.

A principal razão da popularização da simulação é sua habilidade em tratar modelos complicados, referentes a sistemas complexos. Isto torna a simulação uma ferramenta versátil e poderosa. Além disso, a evolução da informática nos últimos anos, bem como a redução dos seus custos, têm tornado financeiramente viável o que, há alguns anos atrás, era extremamente dispendioso. A simulação por computador é usada nas mais diversas áreas, tais como: meteorológica, treinamentos de estratégia para militares, pilotagem de veículos ou aviões e na siderurgia.

2.1.1 Definição de simulação

De acordo com Shannon (1998) a simulação é um processo de construção de um modelo de um sistema real e que permita realizar experimentos com o mesmo, com o propósito de entender o comportamento do sistema e/ou avaliar várias estratégias de comportamento do mesmo, ou seja, é um método de modelagem utilizado para implementar e analisar uma situação real ou proposta, utilizando-se para isto o computador ou protótipos físicos.

Segundo Freitas (2001), a simulação computacional de sistemas, ou simplesmente simulação, consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de praticamente qualquer tipo de operação ou processo do mundo real.

Segundo Kelton *et al.* (2001), a simulação se refere a um amplo conjunto de métodos e aplicações para representar o comportamento de sistemas reais, das mais diversas áreas, geralmente em computadores, através de *softwares* apropriados.

Simulação é uma das mais poderosas ferramentas de análise disponíveis para os responsáveis por projeto e operação de processos complexos ou sistemas. Em um mundo de crescente competitividade, simulação se tornou uma ferramenta muito poderosa para planejamento, projeto e controle de sistemas. Não mais renegado ao posto de “último recurso”, hoje ela é vista como uma metodologia indispensável de solução de problemas para engenheiros, projetistas e gerentes (PEGDEN *et al.*, 1990).

Em outras palavras, simulação é a técnica de estudar o comportamento e reações de um determinado sistema através de modelos, que imitam na totalidade ou em partes as

propriedades e comportamentos deste sistema em suma escala menor, permitindo sua manipulação e estudo detalhado.

2.1.2 Conceitos básicos de simulação

2.1.2.1 Sistemas

Segundo Law e Kelton (1991), em determinados períodos de existência de um sistema, surge a necessidade de estudá-lo para melhor compreender as relações entre seus componentes ou prever seu desempenho mediante novas condições. Porém, muitas vezes é difícil analisá-los em sua forma natural, seja por restrições de acesso, medição, custos ou fatores de risco. Desta forma, costumam-se construir modelos capazes de representar sistemas.

Sistema (do grego “sýstema” = reunião, grupo) é a combinação de elementos coordenados ou organizados de forma a se alcançar um objetivo. É um conjunto de elementos, materiais ou idéias, entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação.

Os sistemas podem ser contínuos ou discretos. Os sistemas discretos são aqueles constituídos de componentes discretos ou inteiros. Já nos sistemas contínuos a principal entidade em estudo existe em quantidades contínuas. A definição do sistema, assim como a delimitação de suas fronteiras com o meio ambiente, vai sempre depender do problema que se deseja analisar.

Segundo Motta (1972), para previsão do comportamento de um sistema, dispõe-se dos seguintes meios:

- O método analítico que consiste na utilização da lei geral para previsão dos valores das grandezas que interessam em função dos valores de outras grandezas, com o grau de precisão desejado;
- O método empírico que consiste em construir o sistema de alguma maneira e prever o comportamento futuro a partir de observações apoiadas na hipótese de que as características não se alterarão;
- O terceiro método de previsão consiste em recorrer a observações efetuadas em outro sistema, que se comporte de modo semelhante ao sistema cujo comportamento se quer prever, mas que apresente dimensões menores, no qual seja mais fácil introduzir modificações ou variar sob controle os valores das grandezas serem consideradas. Neste caso, denomina-se protótipo o sistema cujo comportamento se quer prever. O modelo é o

sistema a partir do qual se efetuam previsões válidas para fins de engenharia, que podem ser classificados de vários modos.

De acordo com Silva (2008), alguns autores expõem a necessidade de se estudar os sistemas para tentar aferir algumas hipóteses sobre os relacionamentos entre os vários componentes ou para prever o desempenho do sistema sob novas condições. Algumas das diferentes maneiras existentes para se estudar um sistema são comentadas a seguir:

- **Experimento com o sistema real versus Experimento com um modelo do sistema real:** se for possível alterar o sistema fisicamente e então fazê-lo operar sob as novas condições, é provavelmente desejável assim proceder. Entretanto, tal situação raramente ocorre, porque um experimento poderia, com frequência, ser muito caro ou desestabilizar o sistema. Além disso, o sistema poderia não existir, mas ainda assim haveria a necessidade de estudá-lo de acordo com várias propostas de configurações alternativas para observar como ele poderia ser construído. Por essas razões, é usualmente necessário construir um modelo como uma representação do sistema e estudá-lo como um substituto para o sistema real.
- **Modelo físico versus Modelo matemático:** os modelos físicos normalmente se parecem com o que eles representam, mas diferem no tamanho; são réplicas, geralmente de dimensões reduzidas. Os modelos físicos são frequentemente específicos, concretos e difíceis de manipular para fins experimentais. Os modelos matemáticos usam símbolos em lugar de dispositivos físicos; eles representam um sistema em termos de relacionamentos lógicos e quantitativos, os quais são manipulados para se observar como o modelo reage, e então como o sistema reagiria. Um modelo de simulação é um tipo particular de modelo matemático.
- **Solução analítica versus Simulação:** uma vez construído, um modelo matemático deveria ser exatamente tratado a fim de se determinar como ele poderia ser utilizado na obtenção de respostas às questões de interesse a respeito do sistema que supostamente representa. Se o modelo é suficientemente simples, pode ser possível trabalhar com suas relações e quantidades para obter uma solução analítica. Se uma solução analítica para um modelo matemático é viável e computacionalmente eficiente, esta é, frequentemente, a abordagem mais adequada. Porém, muitos sistemas são altamente complexos, dificultando qualquer possibilidade de soluções deste tipo. Nesse caso, o modelo deve ser estudado através da simulação, isto é, numericamente experimentado para as entradas em questão,

com o objetivo de determinar como elas afetam as saídas e as medidas de desempenho do sistema.

2.1.2.2 Modelos

Segundo Shannon (1998), um modelo é uma representação de um objeto, sistema, ou idéia, em alguma outra forma que não a da entidade em si. Os modelos reúnem um conjunto de informações e atributos sobre o que se deseja representar, de acordo com os objetivos da análise a ser realizada.

Segundo Pidd (1992, 1994 e 1996), um modelo não deve ser necessariamente tão complicado quanto a realidade que está sendo representada, pois ele faz parte de um sistema usuário-modelo. Os modelos não carregam sozinhos toda a responsabilidade em gerar os resultados corretos para a análise do sistema. Grande parte desta responsabilidade é papel do usuário, que deve usar o modelo adequadamente.

O modelo deve ser capaz de representar com realismo as características qualitativas e quantitativas de um sistema. Desta forma, é necessário estabelecer o grau de precisão requerida, assim como critérios de teste e aceitação do modelo. Não se tem uma regra única para a construção de modelos. Uma boa prática é construir modelos de modo evolutivo, ou seja, deve-se iniciar partindo de um modelo simples até evoluir-se para um mais elaborado, sem perder o foco nos objetivos do estudo. As variáveis e suas relações devem ser consideradas na medida em que forem significativas para a descrição do sistema. O nível de detalhamento de um modelo deve variar conforme o objetivo a ser alcançado.

Os modelos podem ser classificados em:

- **Modelos simbólicos ou matemáticos** são os mais abstratos, portanto, muito utilizados em estudos de sistemas. Estes modelos usam símbolos algébricos e lógicos para representar entidades e suas relações. Um modelo matemático pode ser simples o suficiente para permitir que seja resolvido de forma a se obter uma solução analítica. Entretanto, sistemas muito complexos originam modelos matemáticos igualmente complexos, que dificultam a obtenção de soluções analíticas. Para estas situações, o modelo deve ser estudado através da simulação, sendo experimentado numericamente para entradas variadas e, simultaneamente, avaliado quanto aos seus efeitos sobre as respostas e medidas de desempenho do sistema (KELTON, 2004).

- **Modelos conceituais ou teóricos** descrevem o sistema e/ou seu comportamento através de teorias e/ ou representações gráficas;
- **Modelos físicos ou icônicos** possuem atributos físicos semelhantes ao sistema real, em dimensões reduzidas, tais como protótipos e modelos em escalas. Na construção de um modelo físico de um processo ou de um aspecto particular de um processo, procura-se representar ou modelar o sistema pela mudança dos materiais tratados e também frequentemente a escala de operação. O principal objetivo do modelamento é encontrar uma representação realística do sistema usando materiais e equipamentos de medição que torne o processo econômico.

2.1.2.3 Modelos de simulação

Segundo Law e Kelton (1991), os modelos matemáticos de simulação, ou simplesmente modelos de simulação, podem ser classificados em:

- **Estáticos ou dinâmicos:** os modelos estáticos representam sistemas em um determinado instante do tempo ou sistemas independentes do tempo. Sistemas dinâmicos, por outro lado, representam sistemas que evoluem ao longo do tempo.
- **Determinísticos ou estocásticos:** modelos determinísticos são assim classificados por não possuir elementos aleatórios. Desta forma, se o conjunto de entradas e suas relações for conhecido, o mesmo ocorre com a resposta ou saída do sistema. Modelos estocásticos representam sistemas que precisam ser modelados com pelo menos um componente aleatório. Tais modelos possuem respostas igualmente aleatórias, que devem ser tratadas como estimativas das características verdadeiras do modelo.
- **Discretos ou contínuos:** modelos de eventos discretos representam sistemas de modo que suas variáveis de estado se alteram, instantaneamente, em pontos específicos do tempo, nos quais se dá a ocorrência de eventos, conforme exemplificado na **Figura 2**. Eventos são acontecimentos instantâneos, que alteram o estado do sistema. Modelos de eventos contínuos representam sistemas de modo que suas variáveis se alteram continuamente ao longo do tempo, como mostra a **Figura 3**.

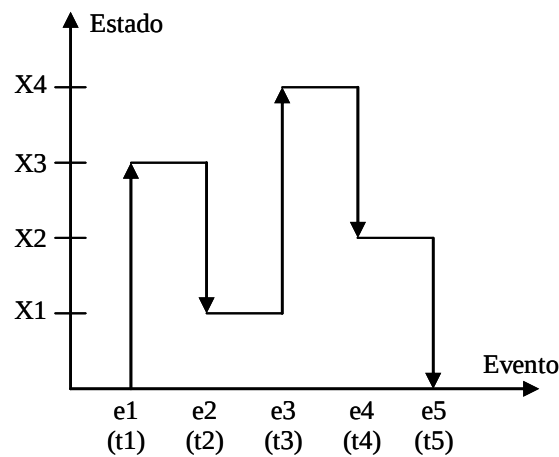


Figura 2 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos discretos.

Fonte: Carvalho (2003).

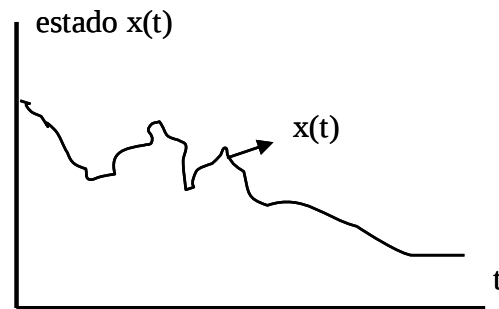


Figura 3 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos contínuos.

Fonte: Carvalho (2003).

É comum encontrar sistemas contínuos sendo tratados como uma seqüência de pequenas alterações discretas no tempo. Simular sistemas contínuos através de softwares de simulação a eventos discretos é possível. Nestes casos, é necessário modelar o sistema de modo a discretizá-lo no tempo. Surge daí a definição de sistemas discretizados, ou seja, sistemas observados em instantes discretos. Suas variáveis de estado variam continuamente, sem alterações bruscas. Porém, seus valores são amostrados apenas em instantes discretos, como se pode observar na **Figura 4**.

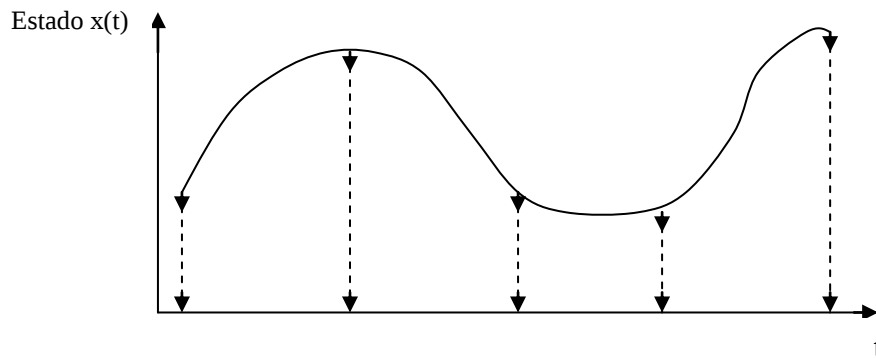


Figura 4 – Comportamento de uma variável contínua discretizada no tempo.

Fonte: Carvalho (2003).

2.1.2.4 Terminologia básica utilizada em simulação

Conceitualmente, existe uma série de elementos básicos na teoria de modelagem e simulação de sistemas, segundo os autores: Law (1991), Freitas (2001), Kelton (2001) e Carson (2004), as principais terminologias utilizadas são:

Variáveis de estado: é o conjunto de variáveis cujos valores definem o estado de um sistema. Constituem o conjunto de informações necessárias à compreensão do sistema em um certo instante de tempo, com relação ao propósito do estudo.

Evento: são acontecimentos, programados ou não, que alteram o estado de um sistema, tal como a chegada de um cliente em um banco e o término do atendimento a este cliente. Eventos primários são programados para ocorrer em algum instante de tempo futuro, calculado com base em suposições estatísticas. Eventos secundários são gerados internamente pela lógica do modelo, como o evento de “início de atendimento”, gerado quando um servidor se torna disponível e existe uma entidade aguardando por atendimento na fila deste servidor. Em alguns modelos de simulação, os eventos não necessariamente alteram o estado do sistema, mas servem para programar outro evento, tal como o fim da simulação ou outra decisão sobre a operação do sistema.

Entidades: são objetos do modelo. Um sistema é formado de um conjunto de entidades explicitamente definidas, que podem ser dinâmicas, movendo-se através do sistema, ou estáticas, servindo às entidades dinâmicas. As entidades dinâmicas são criadas no instante zero ou em outros instantes, através de eventos de chegada e geralmente representam objetos do mundo real, que fluem através dos sistemas. As entidades afetam e são afetadas por outras entidades e pelo estado do sistema, influenciando as saídas e, conseqüentemente, as medidas de desempenho do sistema.

Atributos: são as características próprias das entidades. São dados que fazem parte das variáveis de estado do sistema. Entidades de um determinado tipo possuem os mesmos atributos, porém os valores dos atributos diferem entre as entidades deste tipo, individualizando-as. A definição dos atributos depende do objetivo do estudo.

Recursos: são entidades estáticas que fornece serviço às entidades dinâmicas. Os recursos são alocados pelas entidades. Em geral, estas competem entre si pelos serviços dos recursos. A capacidade de um recurso pode variar, possibilitando-o atender uma ou mais entidades simultaneamente. Uma entidade também pode ocupar mais que um recurso ao mesmo tempo. Os recursos podem assumir diferentes estados, sendo ocupado e livre os mais frequentes. Outros estados possíveis são: bloqueado, em falha e indisponível.

Filas de recursos: são locais no modelo onde aguardam as entidades que desejam utilizar-se de um recurso que se encontra ocupado. Uma fila de espera é uma coleção de entidades com alguma característica comum como, por exemplo, chamadas em espera numa central de atendimento. Existem diferentes modos de se gerenciar filas, conforme as condições de operação de um sistema. A forma mais comum é a FIFO (*first in, first out*), em que a primeira entidade a chegar na fila terá prioridade no atendimento.

Atividades: são períodos de tempo predeterminados antes de sua execução e seu final pode ser programado. A duração da atividade pode ser uma constante, um resultado de uma expressão matemática, podendo ser também um valor aleatório baseado em uma distribuição de probabilidade, fornecida através de um arquivo externo ou também dependente do estado do sistema. O início e o fim de uma atividade são associados a eventos.

Período de espera: é um intervalo de tempo sobre o qual não se tem controle sobre sua duração. Um servidor indisponível por um período não determinado exemplifica esta situação. Uma entidade aguardando em uma fila depende do tempo de processamento de outras entidades para que se saiba o seu tempo de espera ou atraso. O período de espera é delimitado pela ocorrência de eventos.

Tempo real simulado: é o tempo real a ser simulado.

Tempo de simulação: o tempo de simulação representa o tempo necessário à execução de um experimento no computador.

Replicação: é a execução de um experimento, associado a um tempo simulado. As replicações se iniciam e terminam da mesma forma e possuem o mesmo conjunto de parâmetros de entrada. Porém, utilizam diferentes números aleatórios para tempos entre chegadas de entidades e tempos de atendimento.

2.1.2.5 Teoria das Filas

A Teoria das Filas consiste na modelagem analítica de processos ou sistemas que resultam em espera e tem como objetivo determinar e avaliar quantidades que expressam a produtividade e operacionalidade desses sistemas. A Teoria das filas é uma técnica da Pesquisa Operacional que utiliza conceitos de processos estocásticos e de matemática aplicada para analisar o fenômeno de formação de filas e suas características. Essa teoria foi desenvolvida de modo a resolver problemas de congestionamento e dimensionamento de instalações.

As filas de espera por serviços fazem parte do dia-a-dia dos indivíduos na sociedade moderna e, como não podem ser evitadas, tendem a ser toleradas, apesar dos atrasos e das inconveniências que causam. Entretanto, os processos geradores de filas podem ser estudados e dimensionados de forma a aliviar os prejuízos em tempo e produtividade, assim como as perdas financeiras que elas acarretam (FOGLIATTI, M. C, 2007, p. 1)

A fila é formada por aqueles elementos esperando na linha para receber o serviço. Já o sistema de fila inclui a fila, o servidor e qualquer elemento que esteja sendo servido naquele momento. Após a identificação do modelo que se adequa ao sistema sob análise, são determinadas as medidas de desempenho do mesmo. Essas medidas devem ser analisadas levando-se em consideração o ponto de vista do usuário e o da gerência.

Do ponto de vista do usuário, as medidas essenciais indicativas do desempenho do sistema são o tamanho médio da fila e os tempos médios de espera na fila e de permanência no sistema. Do ponto de vista da gerência, as medidas de interesse são as que traduzem o

volume de serviço realizado e dentre essas tem-se: tempo médio de serviço e tempo médio ocioso dos servidores.

O serviço oferecido pode depender de atividade humana, de equipamentos ou de ambos. Em qualquer dos casos, existem capital investido e custos operacionais e de manutenção. O correto dimensionamento do serviço no que se refere ao número de postos de atendimento e à velocidade de processamento é essencial para se manter um equilíbrio entre o capital disponibilizado no sistema e os retornos financeiros/ sociais do mesmo.

O dimensionamento do sistema, considerando apenas um dos pontos de vista mencionados, implica em insatisfação/ perdas para o outro setor envolvido. Na **Figura 5** pode-se observar a relação das funções dos custos das gerências versus os custos do usuário em função da variação dos postos de atendimento. Essas funções crescem/ decrescem respectivamente com o aumento do número de postos de atendimento.

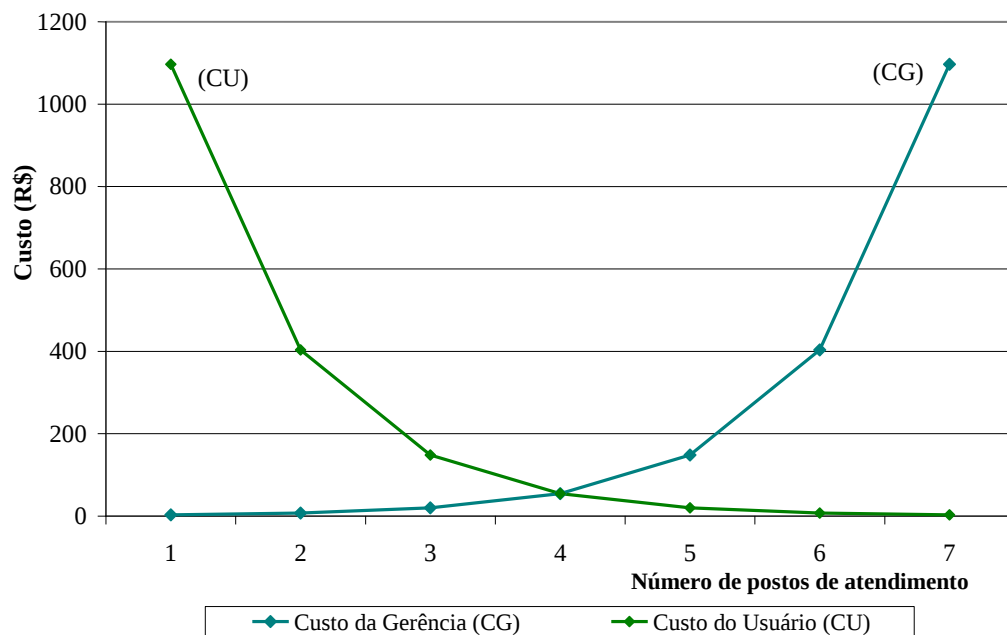


Figura 5 – Custos dos usuários e da gerência em função do número de postos de atendimento.

Fonte: Adaptado de Fogliatti (2007).

Um número de postos de atendimento em excesso produz custos gerenciais elevados, que se repassados aos usuários podem inviabilizar o serviço. Poucos postos de atendimento provocam a insatisfação do usuário. Por isso, faz-se necessária a construção de uma função de custo total, C_T , que de alguma forma englobe os dois pontos de vista, por exemplo: $c_T = aC_U + bC_G$

De maneira geral, uma fila resulta da falta de programação do sistema, pois se fosse possível organizar as chegadas e os serviços, seria possível evitar completamente a espera dos clientes. Mas, na maioria dos sistemas, é impossível programar as filas, pois as chegadas e os serviços são geralmente aleatórios.

São apresentados a seguir alguns termos básicos relacionados à Teoria das Filas:

- **Cliente:** unidade de chegada que requer atendimento. Os clientes podem ser pessoas, máquinas, peças etc.
- **Fila:** número de clientes esperando atendimento. Normalmente, a fila não inclui o cliente que está sendo atendido.
- **Canal de atendimento:** processo ou sistema que realiza o atendimento dos clientes. Pode ser um canal múltiplo ou único.
- **Taxa de chegada:** a taxa segundo a qual os clientes chegam para serem atendidos.
- **Taxa de atendimento:** a taxa segundo a qual um canal de atendimento pode efetuar o atendimento requerido pelos clientes.
- **Prioridade:** critério de decisão sobre a ordem de atendimento. O pressuposto mais comum é o de que quem chegou primeiro será atendido primeiro.
- **Tamanho da população:** tamanho do grupo que fornece os clientes. Se houver apenas alguns clientes potenciais, a população será finita. Se houver um número grande de clientes potenciais, acima de 30 ou 50, geralmente se diz que a população é infinita.
- **Taxas de distribuição de chegada:** o pressuposto mais comum é a distribuição de Poisson. Isto implica que os eventos “atendimento” e “chegada” são completamente independentes.
- **Número esperado na fila:** número esperado de clientes que aguarda atendimento.
- **Número esperado no sistema:** número esperado de clientes na fila e/ou sendo atendidos.
- **Tempo esperado na fila:** tempo que se espera que um cliente gaste aguardando em fila.
- **Tempo de sistema esperado:** tempo que se espera que um cliente gaste aguardando e sendo atendido.

Alguns desses conceitos são considerados medidas de desempenho do sistema de filas. Essas medidas são importantes para se conhecer as características e o comportamento do sistema.

O processo de fila pode ser caracterizado pelos seguintes elementos:

- **Especificação da população de clientes:** finita ou infinita;

- **Distribuição da probabilidade do intervalo de tempo entre chegadas:** a distribuição de chegada descreve o padrão pelo qual os elementos chegam para serem atendidos;
- A **disponibilidade do serviço:** alguns sistemas só atendem durante um certo intervalo de tempo, outros estão sempre disponíveis;
- A **capacidade do sistema**, isto é, o número de clientes atendidos simultaneamente: as unidades podem ser atendidas individualmente ou em grupos;
- A **duração do tempo de serviço de cada cliente:** a distribuição de serviço descreve o padrão pelo qual o servidor provê o serviço. Pode ser constante ou aleatório;
- **Número de canais e fases:** o número de canais descreve o número de linhas que existem em um sistema; o número de fases se refere ao número de instalações de serviço através das quais um elemento pode passar antes de se completar o serviço;
- **Disciplina da fila:** é o conjunto de regras que determinam a ordem em que os elementos da fila são atendidos.

Numerosos modelos de filas estão disponíveis para avaliar diferentes combinações de distribuição de chegada, distribuição do tempo de serviço e outras características. A seguir apresentam-se a notação dos termos mais relevantes utilizadas nos modelos de fila:

- t_0 = instante de tempo de início de operação do processo;
- t^* = instante de tempo no qual o processo entra no regime estacionário;
- *FIFO* = disciplina de atendimento *first in – first out*
- U = fator de utilização (porcentagem de tempo que todos os serviços estão ocupados);
- P_0 = probabilidade de não haver elementos no sistema;
- L = número médio de usuários no sistema;
- L_q = número médio de usuários na fila esperando pelo serviço;
- T = tempo de permanência de um usuário qualquer no sistema;
- T_q = tempo de um usuário qualquer na fila;
- W = tempo de permanência de um usuário qualquer no sistema;
- W_q = tempo médio de espera de um usuário qualquer na fila;
- P_w = probabilidade de que um elemento de chegada tenha que esperar por serviço;
- P_n = probabilidade de n clientes no sistema;
- λ = taxa de chegadas;
- μ = taxa de atendimento;
- σ = desvio padrão

2.1.2.5.1 Modelo M/ M/ s

O modelo M/ M/ s é apropriado para analisar problemas de filas onde as seguintes aceitações são encontradas:

- Há s atendentes, sendo s um número positivo e inteiro;
- O processo de chegada segue uma distribuição de Poisson e ocorre numa proporção média de λ por período de tempo;
- Cada atendimento ocorre em torno de uma proporção média de μ por período de tempo, seguindo uma distribuição exponencial;
- O processo segue a regra FIFO;
- Temos $\lambda < s\mu$.

Para este modelo, têm-se as seguintes relações:

$$U = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (1)$$

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda / \mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda / \mu)^s}{s!} + \left(\frac{s\mu}{s\mu - \lambda} \right) \right)^{-1} \quad (2)$$

$$L_q = \frac{P_0 (\lambda / \mu)^{s+1}}{(s-1)! (s - \lambda / \mu)^2} \quad (3)$$

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (4)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (5)$$

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

$$P_w = \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^s \left(\frac{s\mu}{s\mu - \lambda} \right) P_0 \quad (7)$$

$$P_n = \frac{(\lambda / \mu)^n}{n!} P_0, \text{ para } n \leq s \quad (8)$$

$$P_n = \frac{(\lambda / \mu)^n}{s! s^{(n-s)}} P_0, \text{ para } n > s \quad (9)$$

2.1.2.5.2 Modelo M/ G/ 1

O modelo de fila M/ G/ 1 é completamente notável porque pode ser usado para computar as operações características quando operando para todo o sistema, com chegadas de clientes

seguindo uma distribuição de Poisson, com média do tempo de serviço μ e desvio σ . As expressões abaixo referentes a este modelo não requerem que os tempos do serviço sigam uma distribuição específica de probabilidade.

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} \quad (10)$$

$$L_q = \frac{\lambda^2 \sigma^2 + (\lambda / \mu)^2}{2(1 - \lambda / \mu)} \quad (11)$$

$$L = L_q + \lambda / \mu \quad (12)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (13)$$

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (14)$$

$$P_w = \frac{\lambda}{\mu} \quad (15)$$

2.1.2.5.3 Modelo M/ D/ 1

O modelo M/ D/ 1 pode ser usado quando os tempos do serviço são aleatórios com desvio médio e padrão conhecido. Entretanto, os tempos do serviço não puderam ser aleatórios em alguns sistemas de filas. Por exemplo, em um ambiente de manufatura não é incomum ter uma fila de material ou os subconjuntos que esperam para ser prestado serviço de manutenção por uma determinada máquina. O tempo de máquina requerido para executar o serviço pode ser muito previsível - como exatamente 10 segundos.

Este modelo pode ser usado nestes tipos de situações onde os tempos do serviço são determinísticos (não aleatório). Os resultados para um modelo M/ D/ 1 podem ser obtidos usando o modelo M/ G/ 1, determinando o desvio padrão do tempo do serviço para 0 ($\sigma = 0$). Ajustando $\sigma = 0$ indica que nenhuma variabilidade existe nos tempos do serviço e, conseqüentemente, o momento do serviço para cada unidade é igual ao tempo médio μ do serviço.

2.1.3 Vantagens e desvantagens da simulação

A simulação tem inúmeras vantagens sobre os modelos puramente analíticos ou matemáticos, pois através dela pode-se experimentar modelos de sistemas reais, sem a necessidade de fazer testes empíricos, nos próprios sistemas, podendo causar distúrbios, ou

implementar mudanças sem análises prévias, o que representa riscos. As vantagens da simulação são abordadas por Shannon (1998) Law e Kelton (1991), Freitas (2001), Carson (2004), dentre elas podemos citar:

- O conceito básico da simulação é de fácil compreensão, a credibilidade é maior pelo fato do seu comportamento ser comparado com o sistema real, permitindo testar hipóteses para verificar porque e como certos fenômenos ocorrem no sistema real;
- Muitos sistemas reais são complexos e envolvem fatores aleatórios. Modelos matemáticos associados a estes sistemas são difíceis ou impossíveis de serem analisados analiticamente. Nestes casos, a simulação é, muitas vezes, a única alternativa;
- Propostas alternativas de projetos de sistemas ou de políticas de operação podem ser comparadas através da simulação, permitindo escolher o que melhor atende aos requisitos e que proporcione o melhor desempenho, antes mesmo de modificar ou construir um sistema. É possível a identificação de problemas tais como gargalos e falhas;
- Modelos analíticos exigem que sejam feitas simplificações, de modo a enquadrá-los em um modelo padrão e torná-los matematicamente possíveis de serem solucionados. A simulação, por sua vez, permite que sejam construídos modelos mais realistas e possibilita a análise de um conjunto maior de medidas de desempenho;
- O tempo de simulação é controlável. A simulação permite estudar sistemas que evoluem lentamente ao longo do tempo, em um curto intervalo de simulação. Permite também que se avalie em detalhe o funcionamento de um sistema dinâmico, através do controle da velocidade de execução da simulação;
- Em situações onde se dispõe de conhecimento parcial das variáveis de um problema e das relações entre elas, a simulação permite compreendê-las melhor e identificar quais delas exercem maior influência sobre o desempenho do sistema. O recurso de animação facilita o entendimento do sistema e a comunicação entre as pessoas envolvidas.

Por outro lado, a simulação apresenta algumas desvantagens, a saber:

- A construção de modelos de simulação demanda tempo, investimento em recursos e experiência. A utilidade do estudo depende da qualidade do modelo desenvolvido e da habilidade do modelador. Em alguns casos, soluções analíticas, como teoria das filas, podem trazer resultados mais simplificados, porém menos dispendiosos;
- A obtenção de dados confiáveis para entrada no modelo às vezes demanda muito tempo. E a qualidade da resposta do modelo está diretamente correlacionada com a qualidade dos

dados coletados, ou seja, quanto melhores os dados e a modelagem do sistema, melhores serão os resultados obtidos;

- A simulação gera estimativas das verdadeiras características do sistema, para um conjunto particular de parâmetros de entrada. Desta forma, são necessárias várias replicações para cada conjunto de parâmetros a serem analisados;
- Os resultados da simulação podem ser difíceis de serem interpretados, pois são aleatórios, dada a necessidade de capturar a variabilidade dos sistemas reais. Isto dificulta a identificação dos resultados da simulação como causas da variabilidade do sistema ou de alguma interação significativa.

2.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

2.2.1 Métodos de modelagem segundo diferentes visões de sistemas

Segundo Nance (2004), um conceito fundamental a ser considerado na metodologia de modelagem é a visão de sistemas a ser adotada. Cada uma das três visões clássicas de sistemas baseia-se, respectivamente, no agendamento de eventos, na busca por atividades ou na interação de processos. A importância deste conceito está estritamente relacionada ao desenvolvimento das linguagens de programação para simulação e de simuladores.

De acordo com Freitas (2001), a abordagem adotada na modelagem é o próprio ponto de vista da realidade do sistema pelos especialistas em simulação. Podemos basicamente citar os métodos de modelagem por eventos, por atividade e por processo.

Na visão de modelagem por eventos, as interações entre entidades criam ou estão relacionadas a eventos, que por sua vez alteram o estado do sistema. A modelagem deve ser construída partindo da identificação e da ocorrência dos eventos característicos do modelo, estes sendo incondicionais, ou seja, dependem unicamente do tempo de simulação no relógio do programa e, conseqüentemente, a execução deste evento se dará dependendo do tempo que o do modelo é rodado. O processo de simulação evolui ao longo do tempo de acordo com a execução dos eventos que foram predeterminados em tempo de simulação no relógio, definidos numa lista de ocorrência destes eventos. Quando da ocorrência de qualquer outra situação que não seja um evento determinado, estes devem ser previstos e relacionados dentro das rotinas em que esta situação possa ocorrer.

De acordo com Freitas (2001), na modelagem por atividades, entidades interagem com recursos, participando de atividades, sob certas condições. Estas condições definem a ordem destas interações. A modelagem por processos enxerga os sistemas como um conjunto de entidades com características próprias, que fluem pelo sistema. O que diferencia estes métodos é, primordialmente, buscar o próximo evento da lista pelo tempo programado no relógio de simulação como também em testes condicionais, ou seja, o próximo evento de uma lista mais próximo do relógio de simulação ocorrerá somente se certa condição verdadeira for atendida, caso contrário, o evento seguinte será efetuado se este atender ao tempo de simulação e teste condicional simultaneamente.

A modelagem por processos é a forma mais intuitiva. Nela, os sistemas são vistos sob o ponto de vista das entidades, que competem pelos recursos ou cooperam entre si para o cumprimento de tarefas. Segundo Freitas (2001), a modelagem por processos é a forma mais lógica de modelagem onde o programa do computador imita o comportamento das entidades através do fluxo do sistema de acordo com as rotinas programadas para o cumprimento das atividades no processo. As entidades são criadas, movimentadas pelo relógio do programa de simulação até que alguma movimentação da referida entidade é cessada por algum tempo para a ocorrência de evento com tempo predeterminado ou não. Esse evento pode ser um tempo de processamento, uma espera em filas nos buffers, uma troca de ferramentas, manutenção, etc.

2.2.2 Metodologia de simulação

Para desenvolvimento de estudos utilizando simulação, o modelador deve seguir uma seqüência de etapas, conhecidas como metodologia de simulação. A **Figura 6** mostra um fluxograma com os passos que compõem um estudo de simulação e as relações entre eles. Um estudo de simulação não é um simples processo seqüencial (LAW; KELTON, 1991). Com o decorrer do estudo, um melhor entendimento do problema pode reconduzir a uma etapa anterior. No estudo de simulação, o analista deve estudar o desempenho do sistema analisando os resultados da simulação e identificando alternativas permitindo soluções cada vez melhor, ou seja, analisar as saídas e identificar alternativas de projeto e configurações possíveis.

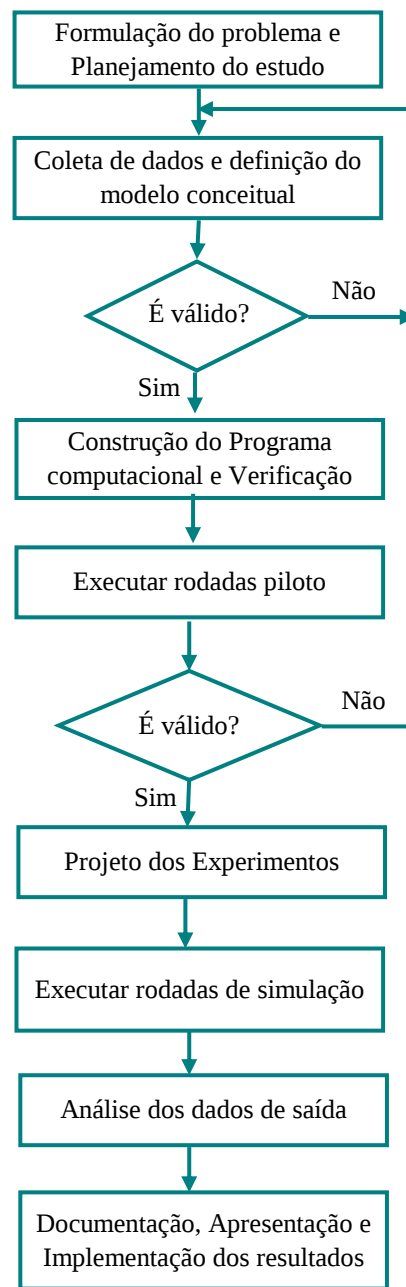


Figura 6 – Fluxograma dos passos de um estudo de modelagem e simulação.

Fonte: Law e Kelton (2000).

- **Formulação do problema e planejamento do estudo**

Todo estudo de simulação inicia com a formulação do problema e pela definição dos objetivos da simulação, a amplitude e a profundidade que se quer da análise e os recursos disponíveis. O projeto de simulação deve se iniciar pela clara definição do problema a ser estudado e pelo estabelecimento dos objetivos a serem alcançados, tais como respostas a serem respondidas e hipóteses a serem testadas. Esta etapa inclui a definição do escopo do

sistema e de suas medidas de desempenho, além de um plano de projeto. Este último inclui os recursos de tempo, pessoas, hardware e software a serem envolvidos, e a definição de cenários a serem investigados (FREITAS, 2001).

- **Coleta de dados e definição do modelo conceitual**

A coleta de dados é um processo de recolhimento dos fatos e informações disponíveis que serão processados quando houver necessidade. De posse da formulação do problema, a coleta dos dados deve obedecer alguns critérios como, por exemplo, haver uma quantidade suficiente de dados sendo estes confiáveis e ainda devem ser significativos para o processo de decisão. Nesta fase, o sistema é abstraído através de um modelo conceitual e informações sobre o sistema são coletadas, quando disponíveis (GAVIRA, 2003). Os dados coletados são validados e tratados, e em seguida, utilizados para definir os procedimentos operacionais de funcionamento do sistema e as distribuições de variáveis aleatórias a serem usadas no modelo. A definição do modelo de um sistema, com um determinado objetivo, é mais uma arte do que uma ciência. Pode-se representar o sistema de forma gráfica, tal como em fluxogramas, ou através de pseudocódigos, definindo-se os componentes, variáveis, relações entre eles e suposições a serem feitas. Uma boa prática é a construção de modelos inicialmente simples, que vão evoluindo em complexidade, na medida em que for necessário, conforme os objetivos a serem alcançados (FREITAS, 2001).

- **Validação do modelo conceitual**

Deve-se traçar um esboço do sistema de forma gráfica ou algorítmica, fazer a definição dos componentes e descrever as variáveis e interações lógicas que constituem o sistema. No desenvolvimento do modelo conceitual, é fundamental que as pessoas familiarizadas com a operação do sistema sejam envolvidas. Nesta etapa, deve-se percorrer o modelo, considerando-se as suposições feitas na etapa anterior, de modo a validar o modelo construído em conjunto com os especialistas do sistema real. A adequação das distribuições de probabilidade para a geração das variáveis aleatórias do problema também deve ser verificada, através de testes de aderência estatísticos (LAW; KELTON, 1991).

- **Construção e verificação do modelo computacional**

Esta fase inicia-se com a programação do modelo em uma ferramenta de simulação. Deve-se definir pela utilização de uma linguagem de simulação de propósito geral,

linguagem de simulação ou pacote de simulação. Em seguida, deve-se verificar se o modelo funciona de acordo com o desejado, sem erros de sintaxe e lógica, conforme os objetivos do estudo e suposições definidas. Existem várias técnicas, tais como: testar o modelo alimentando-o com uma ampla variação dos valores dos parâmetros de entrada, utilizar dados de entrada determinísticos que possibilitem determinar a saída do modelo com precisão, utilizar as facilidades do simulador como o depurador e a animação, dentre outras (CARSON II, 2004). É importante considerar que os erros encontrados podem ser causados por dados de entrada, modelo conceitual ou pelo programa computacional, segundo Sargent (2004).

- **Realização de execuções piloto**

Execuções piloto são realizadas com o modelo já verificado, com o objetivo de serem utilizadas na etapa seguinte, de validação do modelo computacional.

- **Validação do modelo computacional**

Esta etapa consiste em determinar se o modelo programado é uma representação confiável do sistema real. A validação é obtida, em geral, pela calibração do modelo, através de um processo iterativo que compara o comportamento do modelo e do sistema real, até que se atinja um modelo com a confiabilidade requerida pelo estudo (BANKS, 1996). As execuções piloto podem ser usadas para testar a sensibilidade do modelo a pequenas variações nos parâmetros de entrada. Se possível, deve-se comparar as saídas e medidas de desempenho obtidas nas experimentações com o sistema real, utilizando-se inclusive dados históricos do sistema na execução da simulação.

- **Projeto dos experimentos**

Antes da realização da simulação, é preciso decidir algumas questões como as condições iniciais para a execução da simulação, a duração do período transiente do sistema, a duração de cada simulação e o número de replicações de cada simulação (LAW; KELTON, 1991). Não existem regras rígidas para determinar a duração e o número de replicações, pois estas medidas dependem da natureza do sistema e dos objetivos do estudo. O número de replicações afeta diretamente a precisão estatística das medidas de desempenho, pois interfere no intervalo de confiança dos valores estimados (CARSON II, 2004).

- **Realização de execuções de simulação**

Nesta etapa, são executadas as simulações, que geram as respostas do modelo, bem como suas medidas de desempenho.

- **Análise dos resultados**

A geração de números aleatórios, baseados em distribuições de probabilidade, alimenta modelos de simulação. Por serem aleatórios, no entanto, tais valores podem apresentar grande variabilidade (LAW; KELTON, 1991). Desta forma, uma única replicação pode produzir estimativas que variam significativamente em relação aos parâmetros reais do sistema. Sendo assim, métodos estatísticos são necessários para projetar e analisar experimentos com modelos de simulação. Segundo Law e Kelton (1991), técnicas estatísticas são utilizadas na análise dos dados de saída da simulação. O objetivo desta fase pode ser a determinação do desempenho de uma dada configuração do sistema, através da construção de um intervalo de confiança, ou a comparação entre diferentes configurações possíveis. Os dados de saída do modelo e do sistema são comparados, através de testes estatísticos clássicos, como o teste *t*, qui-quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS). Ao final desta análise, pode-se concluir que um maior número de replicações será necessário para que se obtenha a precisão estatística desejada (FREITAS, 2001).

- **Documentação e implementação dos resultados**

É necessário documentar o desenvolvimento da simulação e o modelo obtido para facilitar o entendimento do estudo realizado por pessoas não familiarizadas com o sistema, bem como a sua reutilização em projetos futuros. Os resultados obtidos são implementados se forem válidos e tiverem credibilidade junto aos tomadores de decisão (GAVIRA, 2003). O sucesso da etapa de implementação depende do bom andamento das fases anteriores.

2.3 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Segundo Kelton *et. al.* (2003), a Simulação de Processos por computador já existe desde a década passada, mas só nos últimos anos vem sendo difundida mais amplamente tanto no meio acadêmico quanto empresarial, graças ao avanço significativo nos sistemas computacionais e à popularização do computador.

A simulação é uma ferramenta que permite projetar o modelo de um sistema real e realizar experimentos com o mesmo, a fim de entender seu comportamento e avaliar estratégias para sua operação.

É possível notar que a simulação compreende, além da construção do modelo, um método experimental que busca:

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias ou hipóteses baseadas nas observações realizadas;
- Utilizar o modelo para prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou em seus métodos de operação.

A Simulação de Eventos Discretos por Computador é uma ramificação da Simulação Computacional, que permite estudar o comportamento e o relacionamento entre diversos componentes de um sistema, considerando o fluxo de informações ou de elementos físicos dentro dele. Trata-se de uma ferramenta poderosa na análise de sistemas muito complexos, já que o computador fica encarregado de monitorar todas as variáveis, alterar os estados e comportamentos conforme programado e gerar estatísticas de todo o experimento. O seu uso é possível graças à disponibilidade de ambientes computacionais voltados para a simulação em eventos discretos, como por exemplo, o software ARENA (Bapat & Sturrock, 2003) que foi utilizado para construção do modelo de simulação operacional. Tais ambientes computacionais permitem que se “descreva” o funcionamento do processo, agregando a este uma parte gráfica que apresenta visualmente o comportamento da simulação.

Segundo Shannon (1992), a simulação de eventos discretos é, atualmente, uma das mais poderosas ferramentas de análise disponível para o planejamento, projeto e controle de sistemas complexos.

Segundo Carrie (1988), na simulação de eventos discretos podemos encontrar os seguintes elementos:

- Entidades: são os elementos do sistema, divididos em temporários ou permanentes. As entidades permanentes, ou recursos, são aquelas que permanecem no sistema do início ao fim da simulação (como máquinas, operadores, etc.). As temporárias são as que entram no sistema a qualquer momento durante a simulação, “circulam” pelo sistema e saem também a qualquer momento (peças, clientes, etc.);
- Atividades: são as operações que as entidades fazem ou deveriam fazer dentro do sistema;
- Eventos: são os instantes do tempo em que ocorrem mudanças no estado do modelo, como inícios ou término de uma atividade;

- Filas: quando uma ou mais entidades aguardam para realizar uma atividade, forma o elemento chamado fila;
- Atributos: são as características específicas de cada entidade, como cor, momento de entrada no modelo, tempo de espera na fila, etc.;
- Estados: são as alterações que sofrem as entidades ao longo do modelo.

Os modelos de simulação podem ser classificados como discretos e contínuos. Nos modelos discretos, as variáveis de estado mantêm-se inalteradas ao longo de intervalos de tempo e mudam seus valores somente em pontos bem definidos, conhecidos como tempo de ocorrência de eventos. Por outro lado, nos modelos contínuos, as variáveis de estado podem mudar seus valores continuamente ao longo do tempo (FREITAS, 2001).

Segundo Cardoso *et al.* (2003, apud CASTRO NETO, 2006, p. 41), operações em grande escala são, por natureza, contínuas e caracterizadas por grandes fluxos de massa. Tal fato conduz a uma tendência de ampliação dos fatores causadores de erros nos instrumentos de medição, que contabilizam as taxas de massa continuamente. A influência da incerteza de medição advinda deste tipo de erro não foi considerada neste trabalho.

Em geral, modelos de simulação contínua envolvem equações diferenciais, que estabelecem a taxa de variação da variável de estado, com relação ao tempo. Segundo Law e Kelton (1991), quando as equações diferenciais são simples, podem ser resolvidas analiticamente, gerando valores para as variáveis de estado ao longo do tempo, em função dos valores iniciais das variáveis de estado. Entretanto, nos casos em que a solução analítica não é possível, são utilizados métodos numéricos, tal como a integração Runge-Kutta, usada para integrar equações diferenciais numericamente.

Modelos contínuos e discretos diferem quanto à frequência em que o estado do sistema precisa ser atualizado, a **Tabela 2** apresenta as diferenças entre estes modelos. Modelos de eventos discretos buscam definir o estado do sistema, observando a ocorrência de uma dada condição ou quantificando as entidades de uma determinada categoria. Tais modelos descrevem sistemas abstraindo sua dinâmica interna. Seus parâmetros estipulam como e com que frequência ocorre as transições entre os estados. Estes parâmetros são definidos através de observações experimentais de sistemas existentes, e capturam a natureza estocástica destes sistemas. Modelos contínuos no tempo modelam a dinâmica interna do sistema. Os estados são definidos, geralmente, como uma medida da energia interna do sistema, tal como medidas de posição e velocidade.

Tabela 2 – Comparação entre modelos contínuos no tempo e de eventos discretos.

Fonte: Pritchett et al. (2000).

Itens	Modelos contínuos no tempo	Modelos discretos no tempo
Sistema a ser simulado	Unidades mecânicas de funcionalidade complexa	Entidades múltiplas, geralmente simples
Estado do sistema	Distribuição de energia dentro do sistema	Caracterização de propriedades do sistema
Medidas de estado do sistema	Posição, velocidade (determinístico)	Tamanho da fila, frequência (propriedades estatísticas)
Fator de atualização	Tempo	Transição entre estados
Capacidade de simulação	Analisar comportamentos determinísticos de unidades mecânicas	Analisar a natureza estocástica das interações entre entidades
Aplicações comuns	Projeto e análises de unidade, treinamento em tempo real	Análise e planejamento de operações com múltiplas entidades

Em modelos contínuos, os algoritmos de simulação aproximam a variação contínua através de atualizações em intervalos de tempo discretos, também conhecidos como *time steps*. Tais intervalos de tempo devem ocorrer a uma taxa duas vezes maior do que a variável de interesse, de modo a capturar seu comportamento (BELTRAMI, 1987 apud PRITCHETT, 2000).

Modelos discretos não são necessariamente utilizados para a modelagem de sistemas discretos, assim como modelos contínuos não são necessariamente usados na modelagem de sistemas contínuos (LAW; KELTON, 1991). A decisão de se utilizar um modelo discreto ou contínuo depende dos objetivos do estudo e das características do sistema.

Muitos sistemas complexos são mais adequadamente descritos através de modelos híbridos, ou seja, uma combinação de modelos contínuos no tempo e de eventos discretos, de acordo com Pritchett *et al.* (2000). Isto ocorre uma vez que existem sistemas que não são nem totalmente discretos nem totalmente contínuos, o que sugere a construção de modelos com características de simulação contínua e de eventos discretos, ou seja, modelos discreto-contínuos, ou híbridos. Existem três tipos de interação que podem ocorrer entre mudanças de variáveis de estado discretas e contínuas:

- Um evento discreto pode causar uma mudança discreta no valor de uma variável de estado contínua;
- Um evento discreto pode provocar uma mudança na relação de variação de uma variável contínua em um determinado instante de tempo;

- Uma variável contínua, ao atingir um valor limite, pode disparar a ocorrência ou programação de um evento discreto.

Coelho e Fioroni (2005) desenvolveram a simulação do manuseio de matérias-primas da ArcelorMittal Tubarão utilizando recursos de simulação discreta. O sistema real de transporte de materiais por correias é contínuo, ou seja, a quantidade de material transportado tem relação direta com o tempo decorrido. A proposta do modelo, para fins de simplificação e significativo aumento no seu desempenho, é “discretizar” o envio. Assim, o envio não será constante com a mesma massa ao longo do tempo, mas sim enviados em lotes grandes a intervalos de tempo definidos.

Carvalho (2003), Fioroni *et al.* (2007) e Coelho (2008) utilizaram-se da discretização de sistemas contínuos para simular e analisar o desempenho de processos. Estes autores discretizaram o fluxo de materiais, tratando-o como uma série de ‘porções’, obtendo resultados estatisticamente similares ao comportamento do sistema real.

A **Figura 7** mostra o principal conceito utilizado neste estudo. Nela, é representado em A o sistema contínuo real e em B o mesmo fluxo de material dividido em ‘porções’ ou ‘blocos’ equivalentes ao montante representado em A. Conforme estes autores, em ambos os casos o material irá sair de sua origem e chegar ao seu destino ao mesmo tempo, usando a mesma capacidade da correia.

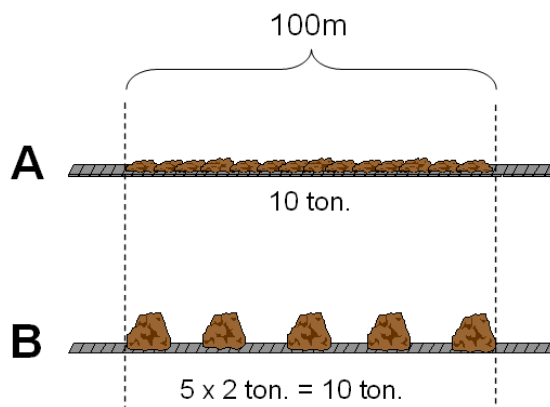


Figura 7 – Representação contínua x discreta.

Fonte: Fioroni *et al.* (2007).

A **Figura 8** mostra o comportamento gráfico da variação do volume transportado de modo contínuo e discreto. A comparação destes dois gráficos mostra que em ambas as situações o resultado final será o mesmo. Tal fato foi comprovado na etapa de validação do

modelo, onde se pôde comprovar a similaridade dos resultados da simulação ao sistema real. Este conceito pode ser aplicado em qualquer situação onde um sistema apresente comportamento contínuo.

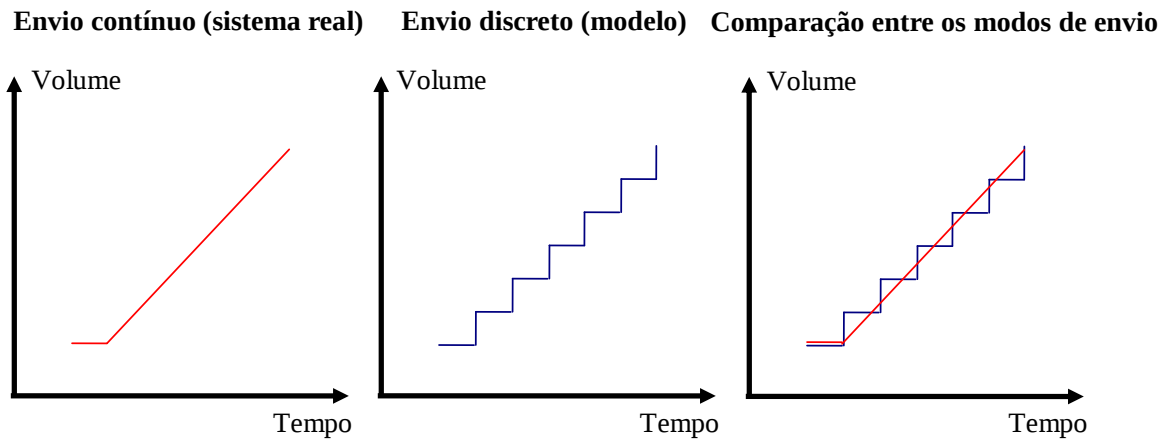


Figura 8 – Representação contínua real (a) e discreta modelada (b) da chegada do material ao destino comparação entre ambos (c).

Fonte: Fioroni *et al.* (2007).

Ambrósio (2007) e Ambrosio, C. W.; Silva, L. B. ; Montenegro, L. C. M. (2008) utilizaram um software de simulação de eventos discretos para a construção de um simulador capaz de analisar o desempenho do sistema de distribuição de LDG (Gás de Aciaria). Como o sistema em estudo era de natureza semi-contínua, foi necessário discretizar o processo ou fluxo do gás, para que o software adotado pudesse ser utilizado. O fluxo de gás LDG na simulação do processo de recuperação e distribuição foi tratado como uma seqüência de porções de volume variável.

2.4 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Os modelos de simulação podem ser implementados através de ferramentas de simulação, por meio de programas codificados em linguagens de propósito geral, linguagens de simulação ou pacotes de simulação. Existem também pacotes de simulação específicos para algumas áreas de aplicação, tais como a manufatura, financeira, sistemas de transporte, dentre outros. Arena e ProModel são exemplos de pacotes voltados à simulação de sistemas de manufatura e de manuseio de matérias-primas.

As linguagens de programação de propósito geral foram as primeiras a serem utilizadas para a simulação, conforme pode-se observar no histórico de uso da simulação da **Tabela 3**. Nesta linguagem um programa é escrito especificamente para cada sistema em estudo. Neste caso, existe grande flexibilidade por parte do programador quanto à criação do modelo matemático, criação de relatórios e tipos de experimentos possíveis de serem definidos. Entretanto, a maior desvantagem desta abordagem é o grau de dificuldade e o tempo necessário à construção dos programas.

Tabela 3 – História do uso da simulação computacional.

Fonte: Adaptado de Kelton *et al.* (1998).

Anos	Ferramenta	Características do estudo de simulação	Exemplos
50 a 60	Linguagens de propósito geral	- Aplicações em grandes corporações; - Grupos de desenvolvimento de modelos com 6 a 12 pessoas; - Gera programas a serem executados em grandes computadores; - Grandes investimentos em capital; - Aplicáveis a qualquer contexto; - Exigem conhecimento profundo da linguagem; - Exigem muito tempo de desenvolvimento; - Não são totalmente reutilizáveis.	FORTRAN, PASCAL e C.
70 e início dos 80	Linguagens de simulação	- Utilização de um maior número de corporações; - Desenvolvimento e uso dos pacotes de linguagens; - Surgem linguagens de programação baseadas no System Dynamics; - Comandos projetados para tratar lógica de filas e demais fenômenos comuns; - Mais amigáveis mas ainda requerem programador especializado.	SIMSCRIPT, GPSS, GASP IV, DYNAMO, SIMAN e SLAN
80 e início dos 90	Simuladores de alto nível	- Introdução do PC e da animação; - Presença de guias, menus e caixas de diálogo; - Simulação realizada antes do início da produção; - Facilidade de uso; - Menos flexível que as linguagens de propósito geral e de simulação; - Projetados para permitir modelagem rápida; - Dispõem de elementos específicos para representar filas, transportadores etc; - Restringem-se a sistemas específicos.	Simfactory e Xcell
Após 90	Pacotes flexíveis de programas de simulação	- Melhor animação e facilidade de uso; - Fácil integração com outras linguagens de programação; - Usada na fase de projeto; - Grande uso em serviços; - Uso para controle de sistemas reais; - Grande integração com outros pacotes (base de dados e processadores de texto); - Aprimoramento dos simuladores, o que permite modelagem rápida; - Integram a flexibilidade das linguagens de simulação, com a facilidade de uso de pacotes de simulação.	Witnews, Extend, Stella, ProModel for Windows, Arena

As linguagens de simulação possibilitam o desenvolvimento de modelos através da construção de programas que utilizam funções previamente escritas, voltadas para simulação de sistemas e permitem a redução do tempo necessário para construção de um modelo. Dentre as linguagens de simulação, pode-se citar: SIMAN, SLAN, GPSS. Com o surgimento da linguagem própria, a simulação foi difundida nos setores de engenharia e negócios.

Com o avanço dos computadores e da competitividade entre as indústrias, no decorrer dos anos 80, a simulação foi bastante difundida e programas direcionados a estas indústrias foram criados, tais como: Arena, ProModel etc, sendo essas ferramentas de simulação usadas por profissionais de diversas áreas e com diferentes níveis de conhecimento em simulação.

A partir dos anos 90 surgiram programas de simulação ou pacotes de simulação mais flexíveis, com mais recursos de animação e integração com outras linguagens de programas. Os pacotes de simulação permitem a simulação de sistemas através de pouca ou nenhuma programação (Law e Kelton, 1991). O modelo é construído de modo intuitivo, independente dos detalhes de implementação (VAN BEEK; ROODA, 2000). Pode-se utilizar rotinas e bibliotecas previamente compiladas e que podem ser selecionadas através de menus e objetos gráficos e posteriormente inseridas, após alguma parametrização, em um programa principal. Os simuladores possuem características tais como: interface gráfica, animação do modelo, ferramentas estatísticas de tratamento de dados e geração de relatórios. Desta forma, simuladores exigem um menor tempo de desenvolvimento do que as linguagens de simulação. Pacotes de simulação são mais utilizados para análises com alto nível de abstração, ou seja, que não incluam detalhes da lógica de controle dos sistemas.

Em geral os pacotes de simulação são flexíveis, com entidades podendo ser definidas através de atributos gerais, ajustáveis às suas características. O simulador também deve permitir o modelamento de sistemas de forma amigável, através de ferramentas como depuradores e disponibilização de menus de ajuda sobre o uso da ferramenta. Sistemas mais complexos exigem boa performance na velocidade de execução do modelo. Em algumas áreas de aplicação é conveniente que a ferramenta tenha funcionalidades para a simulação de sistemas híbridos (contínuo-discretos) (LAW; KELTON, 1991).

As ferramentas de simulação estão em constante evolução, tornando-se cada vez mais flexíveis e fáceis de usar, além de apresentar mais recursos estatísticos e de animação, permitindo que os processos sejam animados em duas ou três dimensões.

2.4.2 O software de Simulação Arena

O software de simulação conhecido como Arena, utilizado na modelagem do MSO, reúne as vantagens das ferramentas de simulação de alto nível, com a flexibilidade de linguagens de programação de propósito geral. O Arena foi lançado em 1993 pela Systems Modeling Corporation®, uma empresa pioneira em softwares de simulação, sendo a primeira a portar uma linguagem de simulação, o SIMAN, para IBM-PC e a primeira a incorporar uma interface gráfica de animação, o CINEMA, que trabalhava em conjunto com o SIMAN.

A evolução dos softwares resultou no ARENA®, para Windows 5/98/NT, e a seguir apresenta-se as suas principais características:

- O software Arena trabalha com uma interface gráfica, onde o modelo é construído de forma semelhante à montagem de um fluxograma. Este recurso facilita o trabalho do projetista tanto no processo de modelagem como na verificação de erros. A lógica de modelagem compartilha o mesmo espaço usado para criar a parte visual do modelo, como animação e telas explicativas. Esta integração provê grande facilidade para documentação do modelo, onde todos os recursos de desenho podem ser usados para dar destaque ou esclarecer partes da lógica.
- As versões atuais do Software Arena possuem recursos avançados de integração com outros aplicativos de uso comum, como o pacote Office® da Microsoft®. Tal facilidade é possível através da linguagem *Visual Basic for Applications*, que foi licenciada pela Systems Modeling e inserida no Arena®. Através desses recursos é possível criar interfaces amigáveis com o usuário, de modo que o operador do modelo não necessite possuir conhecimentos sobre o Arena®. Uma janela padrão do windows solicita as informações necessárias e aciona o modelo automaticamente. Isto amplia de forma significativa a flexibilidade do pacote, permitindo integrá-lo às outras ferramentas que já fazem parte da cultura da empresa.
- A utilização de *templates* na construção da lógica do modelo. Os *templates* são constituídos de vários blocos SIMAN agrupados (pequenos programas de simulação) em um único bloco, apresentando interface mais amigável com o usuário. Esta primeira simplificação originou os *templates* chamados Support (para modelagem da lógica geral) e Transfer (para modelar o deslocamento de entidades dentro do sistema). Em um novo aprimoramento, os templates Support e Transfer foram usados para construir um *template* ainda mais amigável, no entanto menos flexível, chamado Common. Estes *templates* são partes integrantes do pacote Arena®. Outra evolução lançada pela Systems Modeling foi

Arena Professional®, acrescentando a possibilidade de criação de *templates* específicos pelos próprios usuários.

- O Arena possui uma interface gráfica para os usuários que simplifica o processo de construção de modelos (PRADO, 2004). Há disponibilização softwares adicionais para análise de dados, tais como: o Input Analyzer e o Output Analyzer, que permitem realizar todas as operações necessárias ao tratamento e análise de dados estatísticos para inserir no modelo, assim como os resultados fornecidos pelo Arena ao final da simulação. Estes softwares permitem:
 - O tratamento de resultados gerados pela simulação;
 - A geração de histograma de dados de entrada e ajuste de curva com várias distribuições estatísticas;
 - A leitura de arquivos de dados gerados pelo Arena, e apresentação de intervalos de confiança para avaliação do modelo. Vários outros gráficos também estão disponíveis.
- Além disso, o Software Arena disponibiliza módulos direcionados aos aspectos específicos de sistemas de manufatura e de manuseio de materiais. A versão *Standard Edition* modela de modo eficiente sistemas híbridos (contínuo-discretos) através de facilidades pré-construídas de modelamento contínuo.

O Software Arena agrupa os seus módulos de rotina e recursos gráficos utilizados na modelagem em *panels* e *templates*. *Panels* agrupam módulos de um mesmo nível de programação. Os *templates* agrupam os *panels* e possuem diferentes aplicações e estruturas de programação. Os modelos podem ser construídos através da combinação de diferentes módulos de *panels* e *templates*, conforme pode-se observar na **Figura 9**.

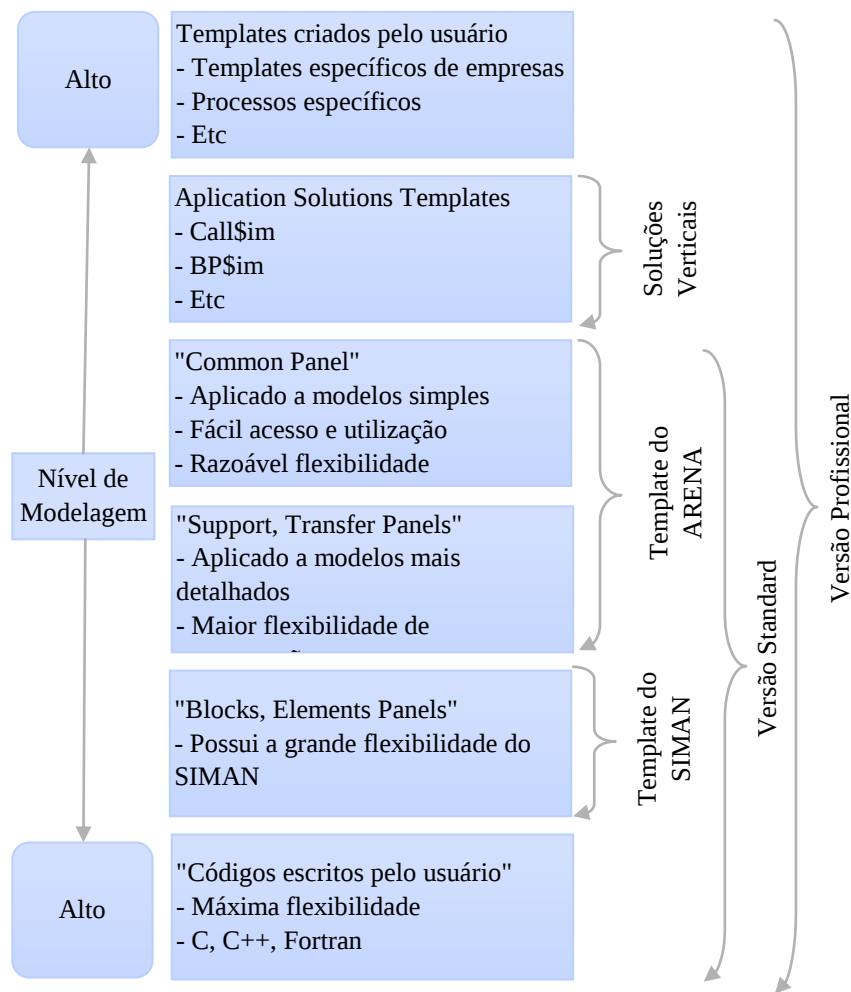


Figura 9 – Estrutura hierárquica do Arena.

Fonte: Kelton *et al.* (2001)

2.5 APLICAÇÕES DE SIMULAÇÃO NO SETOR SIDERÚRGICO

As áreas de aplicação de softwares de simulação são bastante flexíveis, permitindo a modelagem e estudo de sistemas variados, os autores Shannon (1992), Harrell *et al.* (1995), Banks (1998), Law e Kelton (2000) e Fioroni (2005) mostram aplicações da simulação por computador nas áreas de planejamento de projetos, cronograma de manutenção de aeronaves, produção de aço em siderúrgicas, manuseio de matérias-primas, indústria automobilística, aplicações militares, sistemas avançados de manufatura, processos industriais, logística e cadeia de suprimentos.

A seguir, são apresentados alguns estudos de casos sobre modelos de simulação desenvolvidos para o setor siderúrgico.

Morais (2001) investigou o comportamento do terminal de produtos siderúrgicos, denominado Porto de Praia Mole, através do qual é escoada grande parte da produção de placas de aço da AMT – ArcelorMittal Tubarão. Neste trabalho, são observados os tempos de permanência dos navios no porto, pois estes influenciam os custos operacionais dos navios e dos próprios terminais portuários. Os tempos de permanência se dividem em tempo de espera por atracação, tempo de navio atracado, operação de embarque ou desembarque. Quando a taxa de congestionamento do porto se eleva, os tempos de espera são maiores, ocorrendo a formação de filas indesejadas de navios aguardando atendimento. O Terminal de Produtos Siderúrgicos do Porto de Praia Mole foi simulado no ARENA, com a finalidade de conhecer sua performance operacional. Através da comparação de diversos cenários, tais como a modernização de equipamentos, investimentos em infra-estrutura e alterações no regime de trabalho, os parâmetros operacionais do porto foram determinados e analisados em função de seus reflexos nos custos de operação.

D'Audenhove e Abreu (2001) desenvolveram um modelo com a utilização do software de simulação ProModel que retratou com fidelidade a movimentação de materiais na saída da laminadora 2 da Gerdau Cosigua. A Gerdau Cosigua obteve diversos resultados do projeto de simulação, tais como:

- Número adequado de paliteiros;
- Eventuais gargalos da linha;
- Definição de um layout diferente do projetado inicialmente para os transportadores verticais, pois as bobinas chegavam ainda quentes para os transportadores horizontais, prejudicando a compactação;
- Em caso de quebra de algum compactador, foi definido o ritmo de produção sem que houvesse gargalos;
- O tamanho e as características da estanteria tiveram que ser reprojatados, pois a original não atendia à produção esperada, sendo um gargalo;
- Cálculo da capacidade de produção real.

Fioroni e Franzese (2001) desenvolveram um modelo detalhado da Aciaria da siderúrgica Aços Villares com o software ARENA, contemplando as novas opções de lingotamento contínuo e convencional, bem como novas operações e equipamentos na metalurgia secundária, onde eram preparadas as placas antes do lingotamento. A partir do

modelo, a equipe teve a segurança para avaliar diversos aspectos da Aciaria que, de outro modo, não seria possível. Entre outras coisas, a equipe de expansão foi capaz de:

- Verificar o comportamento do sistema produzindo diferentes mix de produtos, e em diferentes quantidades;
- Descobrir, sob cada mix de produção, quais os principais pontos de conflito entre as pontes rolantes;
- Testar diferentes tempos de defasagem dos dois fornos do sistema, e observar o seu impacto na produção;
- Identificar a condição de fornecimento ideal e ininterrupta de matéria-prima, a qual permitiu descobrir qual a capacidade máxima de produção.

Todas as estratégias de movimentação/ operação foram testadas com o modelo. Os problemas detectados no funcionamento da Aciaria resultaram nos ajustes do sistema, cujas melhorias também foram avaliadas no simulador. Ao obter um sistema em perfeito funcionamento e atendendo às expectativas de produção da Villares, a equipe teve segurança para dar início à implantação do projeto. O modelo foi mantido para futuras modificações, tornando-se uma ferramenta de uso permanente para a empresa.

Coelho, Cuzzuol, Ramos e D'Audenhove (2004) desenvolveram o simulador do pátio de carvões da AMT – ArcelorMittal Tubarão que contempla o recebimento, estocagem e manuseio de carvões para consumo na coqueria e nos altos-fornos, com a finalidade de avaliar/ verificar:

- A disponibilidade do pátio para as chegadas programadas de navios e considerando a demanda dos setores consumidores (coqueria e altos-fornos);
- A capacidade efetiva dos três pátios existentes;
- Eventuais faltas de carvão para consumo em função da chegada programada de navios e do próprio consumo.

Para o desenvolvimento do modelo, foi utilizado o software de simulação ProModel. As simulações mostraram que com uma programação adequada de chegada de navios, os três pátios de carvões existentes atenderiam às demandas máximas projetadas para atender a demanda do plano de expansão da AMT.

Coelho e Fioroni (2005) desenvolveram o simulador do manuseio de matérias-primas da AMT – ArcelorMittal Tubarão para avaliar a capacidade efetiva do sistema de recebimento, estocagem, manuseio e abastecimento de matérias-primas para os setores consumidores (altos-fornos, sinterização e calcinação) da AMT. Devido à necessidade de

atender às novas demandas de mercado, a AMT elaborou um plano de expansão da produção de aço de 5,0Mt/ ano para 7,5Mt/ ano, que envolve a ampliação de diversas áreas de produção e consequentemente o redimensionamento de todo o sistema compreendido pelo pátio de matérias-primas. A disponibilidade de matérias-primas para os pontos consumidores no instante em que são solicitadas é imprescindível para atingir este novo patamar de produção, sendo, portanto, essencial um correto dimensionamento dos sistemas envolvidos.

Dentro deste contexto a AMT foi motivada a realizar este trabalho pela necessidade de ampliar seu atual sistema de recebimento e manuseio de matérias-primas, face às novas demandas. O foco da análise consistiu principalmente no recebimento, preparação e abastecimento das cargas metálicas nos altos-fornos para produção de ferro gusa, desconsiderando o abastecimento e movimentação de coque, o qual funciona de forma totalmente independente do sistema simulado.

O simulador foi desenvolvido com o software ARENA e possibilitou à AMT reavaliar e otimizar seus investimentos, e assegurar a expansão da produção, através da avaliação do novo sistema de recebimento, estocagem, manuseio e abastecimento de matérias-primas antes de sua implantação, permitindo:

- Identificar a capacidade de trabalho para os atuais e novos sistemas de correias transportadoras;
- Testar procedimentos operacionais que visam atenuar os impactos das paradas de equipamentos;
- Rever e confirmar as prioridades de movimentação de cada matéria-prima, e a escolha das rotas disponíveis;
- Balancear a utilização dos equipamentos de manuseio das matérias-primas nos pátios;
- Selecionar a melhor posição dos materiais nos pátios;
- Identificar os níveis ideais de reabastecimento para cada ponto de consumo do sistema.

Segundo Lima e D'Audenhove (2005), transporte de gusa líquido, que sai dos altos-fornos em direção à Aciaria, é executado inteiramente por carros-torpedo que são deslocados por locomotivas, utilizando a malha ferroviária interna da planta. A operação atual, de 5 milhões de toneladas por ano, funciona sem provocar "gargalos" nesta movimentação, sendo que o número de carros-torpedo e de locomotivas pode ser considerado suficiente. Para a nova demanda (7,5 milhões de toneladas), estudos anteriores previam a necessidade de compra de mais destes recursos, mas existia o sentimento de que talvez isso não fosse necessário. Outra questão levantada era a mudança na operação de descarga de gusa

na aciaria, pois a compra de um novo equipamento faz com que o gusa realize um de seus processos (a dessulfuração) dentro da aciaria.

O transporte de gusa líquido, que sai dos alto-fornos em direção à aciaria, é executado inteiramente por carros-torpedo que são deslocados por locomotivas, utilizando a malha ferroviária interna da planta. A operação atual, de 5 milhões de toneladas por ano, funciona sem provocar "gargalos" nesta movimentação, sendo que o número de carros-torpedo e de locomotivas pode ser considerado suficiente.

Com os resultados, a ArcelorMittal pôde prever o desempenho de seu sistema de transporte de gusa líquido em situações semelhantes às atuais e também para situações futuras. Foi possível apontar, também, possíveis "gargalos" do processo, através dos resultados de produção dos Altos-fornos, vazão de descarga na Aciaria, quantidade de corridas realizadas, taxas de utilização dos recursos e bloqueios de fluxo em cada etapa do processo. Tais cenários permitiram avaliar as melhorias a serem implantadas, além de subsidiar a decisão do aumento da frota de carros-torpedo e locomotivas nesse sistema. Nesse sentido, o modelo de simulação mostrou gratas surpresas em relação aos estudos em Excel, realizados pela engenharia da ArcelorMittal. Descobriu-se que o número de carros-torpedo necessários para assegurar a produtividade com o acréscimo do Alto-Forno 3 é menor que o previamente pensado. Cada carro-torpedo custa cerca de 2 milhões de dólares, o que evidencia a dimensão da economia alcançada pela ArcelorMittal com o projeto de simulação.

Costhek, Silva e Fioroni (2005) e Costhek (2008), desenvolveram um detalhado modelo de atividades da Aciaria com o software ARENA, em função da elevação da produção da AMT em 50%, para avaliar a capacidade de produção da aciaria com o objetivo de checar se ela seria capaz de absorver a produção adicional de gusa com os novos equipamentos a serem instalados e a necessidade de equipamentos de apoio como carros torpedos, pontes-rolantes e painéis de aço e gusa. Este foi uma aplicação de simulação em um sistema totalmente projetado com recursos e características não presentes no sistema existente. Neste caso, podem-se coletar dados de situações semelhantes, ou estimar os dados de funcionamento dos equipamentos, considerando-se a correspondente margem de erro.

D'Audenhove e Souza (2007), desenvolveram um modelo da Aciaria da Gerdau USIBA, com o software ProModel, com o objetivo de avaliar os seguintes aspectos:

- Comportamento dos equipamentos para cenários com redução gradual do tempo entre corridas;
- Variação do número de cestões para a composição de cada painel de ferro gusa;
- Gargalos nos equipamentos;

- Cenários alternativos, com novos equipamentos e layout diferenciado.

Para tornar tais análises mais completas, foram criados 5 modelos de simulação diversificando o *layout* e os equipamentos. Dentro de cada modelo foram feitos vários testes. Através destes testes foi possível verificar que o maior gargalo do sistema era a ponte-rolante de 180 toneladas. Sendo assim, foram construídos cenários visando a sua utilização da melhor forma possível. Os testes também mostraram que, mesmo na configuração original (apenas com a torre giratória), seria possível conseguir uma redução de até 23% no tempo entre chegadas de painéis no lingotamento. Outros testes mostraram que com a adição de apenas mais um equipamento (mangueira de rinsagem), podia-se atingir uma redução de até 30% neste tempo.

D'Audenhove e Jesus (2008), desenvolveram um modelo de simulação, com interface amigável de entrada de dados e análise de resultados, para a área de lingotamento da ALUMAR em São Luis, MA. O modelo foi desenvolvido para prever se as necessidades comerciais da BHP Billiton e da ALCOA, acionistas da ALUMAR, seriam atendidas na sua totalidade e no prazo estipulado. O escopo do projeto compreendeu desde a chegada dos cadinhos que alimentam os fornos e derramadores até a saída da produção pelas lingoteiras (lingotes de 22,5 kg) e rotativas (lingotes de 350 kg).

O modelo é capaz de analisar fatores tanto estratégicos (análise de gargalos e/ou ociosidade, taxas de utilização dos equipamentos e análise de pontes-rolantes) quanto operacionais (auxílio ao PCP e programação de manutenções preventivas). Para o desenvolvimento do modelo, foi utilizado o software de simulação ProModel. O projeto trouxe ganhos imediatos no processo de tomada de decisão dos novos investimentos, mostrando, por exemplo, que a ocupação dos fornos hoje não é otimizada, uma vez que os fornos dedicados à produção de ligas não apresentam altas taxas de ocupação no tempo, tornando o uso da lingoteira menos eficiente comparado quando o molde é direcionado para a produção de lingotes de metal puro. Outro resultado crucial apontado pelo projeto é que o nível de serviço das pontes-rolantes está satisfatório, uma vez que a configuração atual com três naves auxilia na eficiência do processo, mesmo quando há quebras ou manutenções preventivas.

Santos e D'Audenhove (2009), desenvolveram o simulador de movimentações de composições ferroviárias a partir de uma central de gestão de recursos ferroviários e com a aplicação do conceito de compartilhamento de recursos. Com essas motivações foram desenvolvidos e analisados cinco modelos de simulação das movimentações de composições nas malhas ferroviárias utilizadas pela AMT. Quatro desses modelos foram focados na análise

de diferentes áreas dessas malhas e o quinto modelo foi destinado à análise conjunta dessas quatro áreas. As áreas tratadas são as destinadas ao transporte de aço, gusa e escória, bem como a malha ferroviária em bitola métrica. Para o desenvolvimento de todos os modelos, foi utilizado o software de simulação ProModel. Para cada modelo foram simulados cenários diferentes para comparação de configurações e características das linhas e das composições (locomotivas e vagões). E em cada um deles foram obtidos resultados que demonstram possíveis melhorias de operação/ utilização dos recursos ferroviários, assim como indicadores que mostram caminhos que devem ser mais bem estudados em função dos seus resultados.

Encontram-se na literatura diversos trabalhos que se utilizaram de simulação de eventos discretos, abrangendo áreas diversas entre as quais pode-se citar: logística, transporte aéreo, transporte rodoviário e ferroviário, planejamento e controle da produção entre outros, porém especificamente para a área da siderurgia os projetos desenvolvidos, são poucos e ficaram muito no âmbito da própria empresa.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

A metodologia utilizada para desenvolver o modelo operacional do pátio de matérias-primas é apresentada no fluxograma da **Figura 10**. Iniciou-se pela formulação do problema e planejamento do estudo, após foi elaborada a especificação detalhada do modelo, contendo todos os itens que seriam parametrizados e os resultados que seriam fornecidos pelo modelo. Nesta etapa a construção do fluxograma lógico de funcionamento do sistema de recebimento e manuseio de matérias-primas foi fundamental para entendimento de todo o sistema, após passou-se para a coleta e tratamento de dados e definição do modelo conceitual. Depois da etapa de coleta e tratamento de dados, iniciou-se a modelagem do MSO, a construção do mapa do pátio e a sua integração com o modelo. Depois da construção e validação do modelo iniciou-se as rodadas de simulação, análise e discussão dos resultados. Após a consolidação desta etapa, passou-se para a apresentação e implementação dos resultados.

Para embasar a dissertação, realizou-se uma fundamentação teórica, através de consulta a sites da internet, artigos, dissertações e teses, onde buscaram-se as informações disponíveis e relevantes sobre simulação de sistemas industriais, sobre aplicações de simulação no setor siderúrgico e sobre o software de simulação Arena, utilizado para o desenvolvimento do modelo operacional.

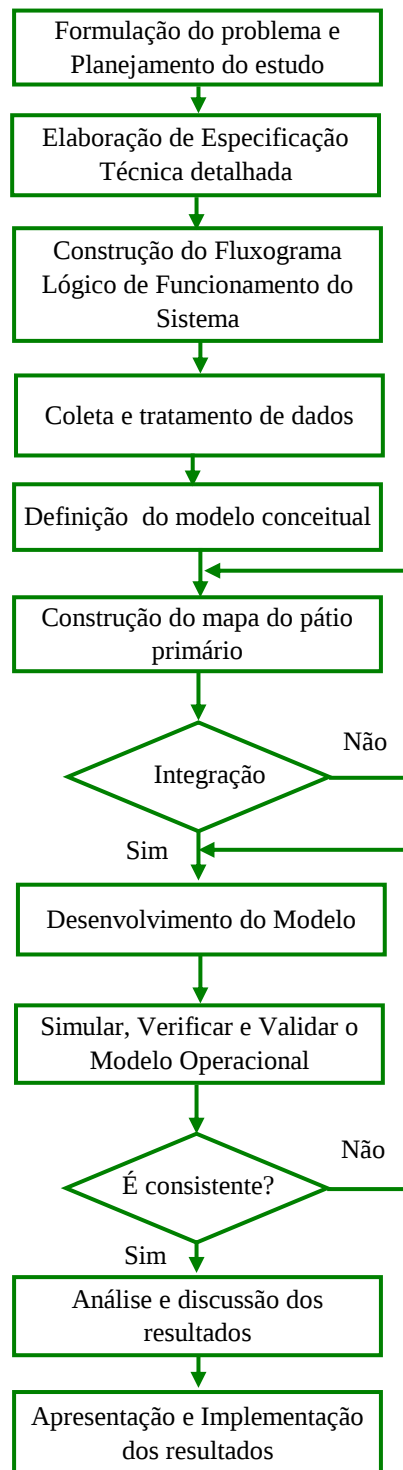


Figura 10 – Fluxograma utilizado para desenvolvimento do modelo de simulação operacional.

A seguir apresentam-se as etapas da metodologia utilizada para desenvolvimento do modelo operacional proposto.

3.1 Formulação do problema e planejamento do estudo

Esta é uma etapa fundamental no processo de desenvolvimento do modelo, onde definiu-se: o objetivo do estudo, o escopo principal, o nível de detalhe requerido, os dados de entrada e saída do modelo operacional, o cronograma de desenvolvimento do projeto, bem como iniciou-se a preparação da especificação básica.

3.2 Elaboração da especificação técnica detalhada do modelo

Para construção do modelo operacional, priorizou-se o desenvolvimento de uma especificação técnica detalhada, de forma a minimizar retrabalhos e interferências durante a modelagem do sistema. As etapas para elaboração da especificação técnica detalhada são apresentadas a seguir:

- Descrição básica de todos os processos do sistema;
- Visitas à área operacional de recebimento, manuseio e abastecimento de matérias-primas, reuniões com especialistas, supervisores e operadores do sistema, o que permitiu:
 - Entender e delimitar o sistema em estudo;
 - Definir os dados de entrada e saída do modelo;
 - Definir os parâmetros e os resultados a serem fornecidos pelo modelo;
 - Definir pela utilização das telas do sistema supervisório do pátio de matérias-primas para modelagem dinâmica do processo, pois os supervisores e operadores da sala de controle já estavam familiarizados com as telas do sistema supervisório o que facilitaria treinamentos futuros.

3.3 Fluxograma lógico de funcionamento do sistema

Elaborou-se o fluxograma detalhado de funcionamento do sistema de recebimento e manuseio de matérias-primas, que mostra as origens e destinos de todas as matérias-primas, e as unidades produtoras que compõem o sistema. A construção do fluxograma lógico de funcionamento do sistema foi fundamental para entender, delimitar e estabelecer as restrições do sistema, o que contribuiu para uma modelagem clara, rápida e consistente.

3.4 Coleta e tratamento de dados

Nesta etapa do processo fez-se o levantamento e tratamento de dados históricos, reuniões com especialistas, supervisores e operadores do sistema. Os dados levantados para o desenvolvimento do modelo são apresentados a seguir:

- Produtividades de todos os sistemas de correias transportadoras para cada matéria-prima do sistema;
- Capacidade nominal, velocidade e comprimento de todas as correias transportadoras do sistema;
- Tempo de descarga de matérias-primas no virador de vagões e no *hopper* rodo-ferroviário;
- Velocidade dos *stackers-reclaimers*;
- Disponibilidade de todos os equipamentos;
- Plano de produção dos setores consumidores/ produtores do sistema;
- Plano de manutenção de todos os equipamentos;
- Volumes de todos os silos do sistema, bem como a capacidade máxima e mínima de cada silo em função do padrão operacional vigente;
- Densidade e ângulo de repouso de cada matéria-prima;
- Matérias-primas transportadas por rota;
- Levantamento de todas as rotas do sistema;
- Volumes de matérias-primas recebidas pelo virador de vagões, pelo *hopper* rodo-ferroviário, pelo sistema correias transportadoras de transporte de pelotas VALE – AMT;
- Volumes de consumo de matérias-primas dos altos-fornos, sinterização, calcinações;
- Volumes produzidos e manuseados pelos altos-fornos, sinterização, calcinações e pelas coquerias;
- Classificação das matérias-primas através das peneiras do sistema;
- Mapa do pátio de matérias-primas;
- Tipos de matérias-primas;
- Telas do sistema supervisorio.

3.5 Definição do modelo conceitual

Neste tópico descreve-se o desenvolvimento do modelo conceitual, através da modelagem de algumas operações específicas do sistema, tais como: o recebimento de matérias-primas e a blendagem. Após a validação iniciou-se a modelagem definitiva do modelo. Nesta etapa fez-se o ajuste estatístico dos dados coletados, definindo-se, por exemplo, qual a distribuição estatística se ajustaria melhor a cada processo/ equipamento modelado.

3.6 Construção do mapa do pátio

O modelo estático do pátio de matérias-primas foi desenvolvido para a validação do modelo dinâmico e para a elaboração do mapa do pátio. Apresentam-se a seguir os parâmetros e resultado esperados deste modelo:

- A entrada e saída de matérias-primas;
- A lista de matérias-primas do pátio;
- As características das matérias-primas, tais como: densidade e ângulo de repouso;
- A quantidade de matéria-prima por baliza, que é variável em função:
 - Da matéria-prima a ser estocada;
 - Das características da matéria-prima;
 - De restrições operacionais;
 - Das dimensões do pátio (comprimento, largura);
 - Da altura da pilha da matéria-prima que é função do ângulo de repouso do material, mas é limitada pela altura de lança do *stacker reclaimer*.
- O preenchimento automático do mapa do pátio;

3.7 Desenvolvimento do modelo

As etapas do desenvolvimento da modelagem do sistema de recebimento e manuseio de matérias-primas são apresentadas a seguir:

- Leitura de dados: contém a lógica que lê os dados da interface e também grava os resultados e histórico de eventos;

- Geradores de transporte: reúne as chegadas de materiais com origem externa ao processo, como virador de vagões e *hopper* rodo-ferroviário;
- Lógica de correia transportadora: executa as operações de ocupação e liberação das rotas e correias em uso pelo processo;
- Lógica de puxada do pátio: representa todas as situações que seja necessário retirar matéria-prima do pátio para envio aos setores consumidores;
- Consumidores de transporte: contém a lógica do recebimento de matérias-primas em todos os equipamentos;
- Lógica de silos: pedido e consumo de matérias-primas;
- Falhas: controla a ocorrência de paradas dos diversos equipamentos do sistema.

3.8 Simular, verificar e validar o modelo de simulação operacional

Nesta etapa do processo, foram simulados diversos cenários utilizando-se dados reais, sistema em regime, e, inicialmente, com todos os equipamentos operando normalmente, para posterior verificação e validação do modelo operacional. A etapa de validação consiste na análise crítica dos dados gerados e em análises de sensibilidade do modelo, verificando-se desta forma se os resultados do modelo têm aderência com o sistema real. A verificação busca mostrar que o programa computacional se desempenhou como esperado e pretendido, fornecendo uma correta representação lógica do modelo. Para validação do MSO realizou-se vários testes, com pequenas alterações no cenário, de forma a comparar os resultados gerados pelo MSO, com uma simulação estática do sistema e com os resultados do sistema real, o que permitiu a validação do modelo dinâmico com maior precisão. Após a validação do modelo, com a utilização do cenário base, passou-se a testar cenários com paradas de equipamentos, silos e sistemas de correias transportadoras, de forma a observar o comportamento dos mesmos e a aderência dos resultados com o sistema real. Este procedimento foi realizado para todos os equipamentos do sistema.

3.9 Análise e discussão dos resultados gerados

Realizou-se a análise crítica e discussão dos resultados gerados pelo modelo operacional. A análise crítica consistiu da verificação de desempenho dos diversos

equipamentos do sistema, considerando o limite de tolerância, a verificação de possíveis gargalos, e a verificação de atrasos excessivos no tempo de manuseio das matérias-primas, ocorridos por falta de recursos ou matérias-primas.

3.10 Apresentação e Implementação dos Resultados

Etapa onde realizou-se a apresentação dos resultados aos supervisores e gerentes da área de recebimento e manuseio de matérias-primas, onde evidenciou-se que o modelo poderia contribuir com a programação do pátio de matérias-primas. Nesta etapa elaborou-se um manual de operação do modelo de forma a nortear os supervisores e os programadores na utilização do modelo. Após a elaboração do manual de operação do modelo, realizou-se rodadas de apresentação do modelo aos programadores, de forma a conscientizá-los da importância da ferramenta, e treiná-los no preenchimento das planilhas de interface, na geração de cenários, na análise e discussão dos resultados e no preenchimento automático do mapa do pátio de matérias-primas.

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DO SISTEMA DE MANUSEIO DE MATÉRIAS-PRIMAS

4.1 Sistema de recebimento, armazenagem e manuseio de matérias-primas

A área de recebimento, armazenagem e manuseio de matérias-primas que compreende um virador de vagões, um hopper rodo-ferroviário e pátios primários tem fundamental importância para a usina porque é onde se inicia o processo produtivo. Portanto, este setor deve satisfazer as exigências de:

- Estoque de segurança e de mínimo custo;
- Recebimento e descarga de matérias-primas;
- Controle da qualidade;
- Empilhamento/ remoção nos pátios primários ou pátios de matérias-primas;
- Operacionalidade dos pátios primários.

O sistema em estudo é constituído por três elementos principais é apresentado no diagrama esquemático da **Figura 11**, na qual será baseada a simulação, quais sejam:

- Recebimento de matéria-prima externa, através de um virador de vagões (**Figura 12**), um hopper rodo-ferroviário (**Figura 13**), e uma correia transportadora que liga a ArcelorMittal Tubarão diretamente à VALE;
- Armazenagem dos materiais recebidos em seis pátios, quatro dos quais dedicados a matérias-primas diversas, e dois dedicados a material blendado (mistura de outros materiais), conforme pode-se observar na **Figura 14**;
- Processadores de matéria-prima, que consomem determinados materiais e os convertem em outros, para uso em outra parte do sistema (sinterização, blendagem);
- Consumidores de matéria-prima, que apenas consomem materiais (altos-fornos, calcinação).

A racionalidade na utilização destes equipamentos permite um ganho significativo de tempo, facilitando ainda as outras operações nos pátios primários. Portanto, um planejamento das atividades desta área conjuntamente com as outras facilitam substancialmente as operações.

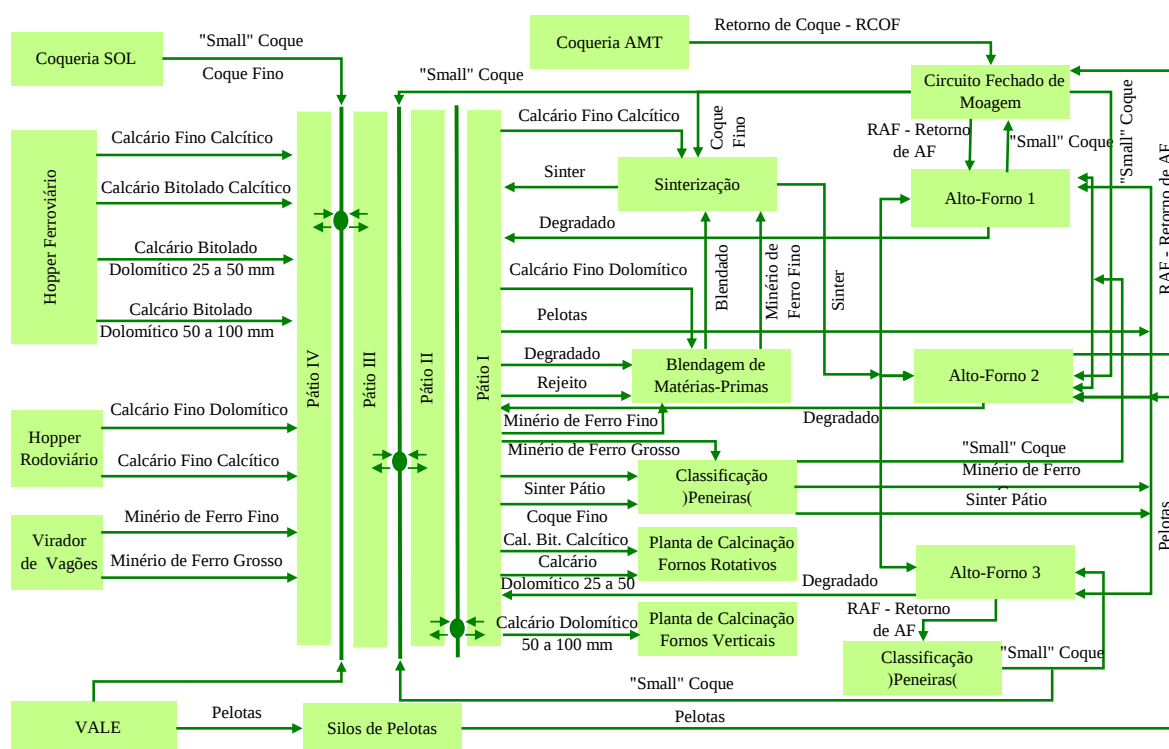


Figura 11 – Diagrama esquemático do funcionamento do sistema de recebimento de matérias-primas.



Figura 12 – Virador de vagões.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão



Figura 13 – Hopper rodo-ferroviário.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão



Figura 14 – Pátios de matérias-primas.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão

A interligação entre as diversas áreas do sistema de recebimento, armazenagem e consumo de matérias-primas é feita através de um complexo sistema composto por 155 correias transportadoras, capaz de levar os materiais de seus pontos de origem até o destino. O sistema de correias transportadoras contempla mais de 158 rotas distintas e 673 rotas compostas, algumas delas são apresentadas no **Anexo 1**, atendendo às mais diversas necessidades de manuseio de matérias-primas.

As matérias-primas minerais utilizadas no processo de redução para obtenção do ferro gusa podem ser classificadas a princípio em minérios de ferro, fundentes e adições.

- **Minério de ferro** são aquelas portadoras do principal elemento que é o ferro, normalmente este aparece combinado com o oxigênio na forma de óxido (composto químico). Esta combinação pode ocorrer de várias formas originando minérios de composição química e características diferentes como veremos mais adiante.
- **Fundentes** podem ser consideradas como fundentes as matérias-primas cujas substâncias agem em um determinado meio escorificando (“separando”) as impurezas introduzidas pelos minérios e dando condição para posterior retirada do produto desejado, no nosso caso o ferro gusa. Os principais fundentes são: calcário (portador de CaO), cal (portador de CaO), dunito (portador de MgO e SiO₂), serpentinito (portador de MgO e SiO₂), dolomita (portador de MgO e SiO₂), quartzo (portador de SiO₂) (RIZZO, 2004).
- **Carvão Mineral** é uma rocha sedimentar, combustível, formada a partir de vegetais resultado de uma série de fatores: a natureza da vegetação, o grau e condição de humificação dos depósitos como turfa, e o histórico geológico envolvendo a aplicação de pressão e temperaturas elevadas às camadas de turfa (ENSIDESA, 1981, apud COELHO, 2003, p. 9).
- **Adições** são matérias-primas portadora de elementos que, em menores proporções, contribuem para se obter um determinado propósito, seja no produto, seja no processo. Como exemplo temos o minério de manganês, a ilmenita etc.
- **Materiais de geração interna** são os materiais originados dentro da própria usina cujo aproveitamento torna-se econômico sem prejudicar o processo de sinterização. Exemplo: carepa, pó de alto-forno, lixo industrial, geração da calcinação, pó de CDQ (Coke Dry Quenching) etc.

- **Carepa** é oriunda da Laminação (escarfagem) e possui um teor de FeO (<60%). A Carepa quando adicionada na pilha pode favorecer a redução de coque na Sinterização.
- **Pó de Alto-Forno** origina-se no coletor de pó do alto-forno. A sua composição química justifica sua utilização devido ao alto teor de carbono. Também pode diminuir consumo de combustível na Sinterização.
- **Lixo Industrial** é basicamente composto de minérios e fundentes, originados da limpeza da área industrial. Deve ser peneirado para utilização na pilha homogeneizada.
- **Geração da Calcinação** estes materiais são decorrentes do processo de preparação da cal para a Aciaria e para a Sinterização. Além da cal peneirada para a Sinterização, temos a pré-cal, a cal britada e a lama de calcário. Todos estes apresentam qualidade e quantidade que justificam sua utilização posterior.
- **Pó de CDQ** é um pó originado do apagamento à seco do coque na coqueria. É importante aproveitá-lo devido seu alto conteúdo de carbono.

As matérias-primas consideradas no estudo são apresentadas na **Tabela 4** destacando-se a classe e subclasse a que pertencem.

Tabela 4 - Matérias-primas consideradas no estudo destacadas por classe e subclasse.

Item	Classe	Subclasse	Sigla	Descrição
1	Calcário Fino	CAFES	CAFES	Calcário Dolomítico Fino ES
2	Calcário Fino	CCFV	CCFI	Calcário Calcítico Fino ES
3	Calcário Fino	CALC	CAFL	Calcário Calcítico Fino MG
4	Calcário Bitolado	CAB	CABT	Calcário Calcítico Bitolado Calmit
5	Calcário Bitolado	DOL	DLMR	Dolomita Bitolada Gandarela
6	Cal - silo	CAL	CAL	Cal Calcítica Fina Corumba
7	Dunito	DUNIT	DUBP	Dunito Bitolado Pedreira Um
8	Minério Fino	MINÉR-PH	SFAC	Finos de Minério Acesita
9	Minério Fino	MINÉR-PH	FMTU	Finos de Minério de Tubarão - Vale
10	Minério Fino	MINÉR-PH	FPTU	Finos de Pelotas de Tubarão
11	Minério Fino	MINÉR-PH	SFFA	Minério de Ferro Fino Fábrica
12	Minério Fino	MINÉR-PH	ITAL	Minério de Ferro Fino Alegria
13	Minério Fino	MINÉR-PH	SFAG	Minério de Ferro Fino Alegria
14	Minério Fino	MINÉR-PH	SFAL	Minério de Ferro Fino Alegria
15	Minério Fino	MINÉR-SINT	SHCE	Minério de Ferro Conceição Silicoso
16	Minério Fino	MINÉR-SINT	STHM	Minério de Ferro Fino Alto Manganês
17	Minério Granulado	ILMEN	ILMG	Ilmenita Granulada de Goiás
18	Minério Granulado	MMG	NPMB	Minério de Ferro Bitolado Mineração Brasil
19	Minério Granulado	NRCA	NRCA	Minério Ferro Bitolado Cauê
20	Pelota	PELOT	PEAF	Pelota de Alto-Forno
21	Quartzo	QZB	QZBG	Quartzo Bitolado Minerações Gerais
22	Rejeito	REJEITOS	PO CARBONOSO	Pó Carbonoso
23	Rejeito	REJEITOS	RCFG	Carepa Fina externa Gerdau/ Cosigua
24	Rejeito	REJEITOS	REMU	Resíduo de Minério de Ferro
25	Rejeito	REJEITOS	RLIX	Lixo Industrial
26	Rejeito	REJEITOS	RCAC	Calcário Fino Recuperado
27	Rejeito	REJEITOS	RLAA	Lama de Aciaria
28	Rejeito	REJEITOS	RSUC	Sucata-C Fina
29	Rejeito	REJEITOS	RCOF	Retorno de coque fino
30	Rejeito	REJEITOS	RESC	Rejeito de escória de aciaria
31	Rejeito	REJEITOS	RESF	Retorno de escória de alto forno
32	Rejeito	REJEITOS	RDEG	Degradado de sinter e minério
33	Rejeito - silo	REJEITOS	RCDF	Rejeito de cal dolomítica
34	Combustível	CSOL	coque sol	Small coque sol
35	Combustível	RAF1	RAF1	Fino de coque do AF1
36	Combustível	RAF2	RAF2	Fino de coque do AF2
37	Combustível	RAF3	RAF3	Fino de coque do AF3
38	Sinter	SINTER	S	Sinter
39	Blendado	BLENDADO	BLEN	Blendado
40	Sinter Retorno	SINT - RETORNO	SIN-RET	Retorno da sinterização

Os elementos processadores de matéria-prima do sistema são: a blendagem é a mistura de vários materiais com características distintas e a sinterização é um processo de aglomeração a quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições,

com dosagens e composições químicas definidas, cujo produto resultante, o sinter, apresenta características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno.

Os elementos consumidores de matérias-primas são os três altos-fornos, que produzem o ferro gusa. Estes têm prioridade absoluta de atendimento, já que a falta de materiais em seus silos geralmente significa perda de produção. Além dos altos-fornos, há a fábrica de cal (calcinação), que consome três tipos diferentes de calcário.

Cada ponto de consumo ou processamento de materiais trabalha com silos, que armazenam uma determinada quantidade de material a ser consumido. Cada silo tem seu conteúdo decrementado paulatinamente, conforme a taxa de consumo daquele material naquele equipamento.

Nos quatro pátios, pode-se armazenar qualquer tipo de matéria-prima, exceto o blendado, que tem outros dois pátios dedicados. Entre os pátios, fica localizado um equipamento denominado *stacker reclaimer* ligado ao sistema de correias e que pode tanto empilhar material quanto remover material da pilha, enviando-o pelas correias, para um determinado consumidor ou processador.

Os pátios de blendado são dois, sendo que um deles está sempre recebendo material para formar a pilha, e o outro disponibiliza material para retirada e envio para a sinterização. Para isso, há um equipamento *blend stacker* que empilha material, e um *blend reclaimer*, que retira o material. Os dois equipamentos trocam de pátio quando a pilha do primeiro pátio é completamente formada.

O sistema possui ainda algumas peneiras, cuja finalidade é classificar os materiais enviados aos altos-fornos. Ao passar por elas, parte do material original é desviado e é classificado como outro material. Por exemplo, ao passar pela peneira, o minério de ferro grosso, retido na peneira, é direcionado para o alto-forno, e o passante, “degradado”, é direcionado para um silo de retorno do alto-forno. Os silos de retorno servem para armazenar temporariamente os materiais peneirados, cuja granulometria não é adequada para serem usados no alto-forno. Ao atingirem um nível elevado, estes silos são esvaziados. Seu conteúdo é transferido e empilhado em um dos quatro pátios, onde será aproveitado na blendagem.

4.2 Modelagem do sistema de manuseio de matérias-primas

Com o objetivo de desenvolver a representação adequada do sistema mencionado anteriormente, foi desenvolvido um modelo de simulação utilizando o software simulação Arena. Apesar de ser um simulador de eventos discretos, a aproximação descrita no capítulo 2 possibilitou a criação de um modelo híbrido. Dessa forma, um sistema contínuo (o transporte de matérias-primas em uma correia transportadora) pode ser simulado usando um algoritmo de eventos discretos (teoria das filas).

A idéia central foi representar um sistema de transporte independente, através de uma programação de entrada, ou, através dos diferentes modais de manuseio de matérias-primas que abastece o sistema. Visto que esta matéria-prima utiliza uma parte específica do sistema de transporte, chamados rotas, o material deve ser conduzido para um dos destinos existentes, tais como: os pátios primários, os silos dos setores consumidores. Os pátios são tratados no modelo como pulmões temporários para o sistema. Os silos são os destinos finais para a maioria das matérias-primas, onde após a dosagem, ocorre a homogeneização e abastecimento dos setores consumidores.

Por se tratar de um modelo operacional que lida com as diversas matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada, é de extrema importância que seja rastreado não somente a matéria-prima que está sendo manuseada, mas também seu tipo e até mesmo sua origem para que a rota a ser utilizada seja definida.

A calibração inicial do modelo, com todas as informações do sistema é uma tarefa difícil, uma vez que o sistema requer a identificação detalhada de uma ampla variedade de dados de entrada, tais como: nível inicial do silo, condição inicial do pátio ou qual equipamento estava programado para manutenção. Todas estas informações são usadas para que o modelo possa identificar os excessos ou faltas de matérias-primas do sistema. Cruzando a produção desejada com as demais restrições impostas pelo modelo, o analista pode medir a eficiência de suas decisões e aceitar ou rejeitar determinada decisão horas antes da mesma ser executada.

Em um modelo estratégico, por exemplo, seria aceitável adotar uma taxa de chegada de material controlada por uma distribuição de comportamento aleatória, cuja modelagem seria extremamente simples em qualquer ferramenta de simulação de eventos

discretos. Mas esse não é o caso de um modelo operacional, que requer um controle exato de que material chegará e em que momento, bem como a sua quantidade.

4.2.1 Sub-modelos do pátio de matérias-primas

O modelo conceitual foi dividido em módulos distintos denominados sub-modelos, e cada sub-modelo contém uma parte distinta da lógica, com operação independente e complementar, e estão organizados conforme a **Figura 15**.

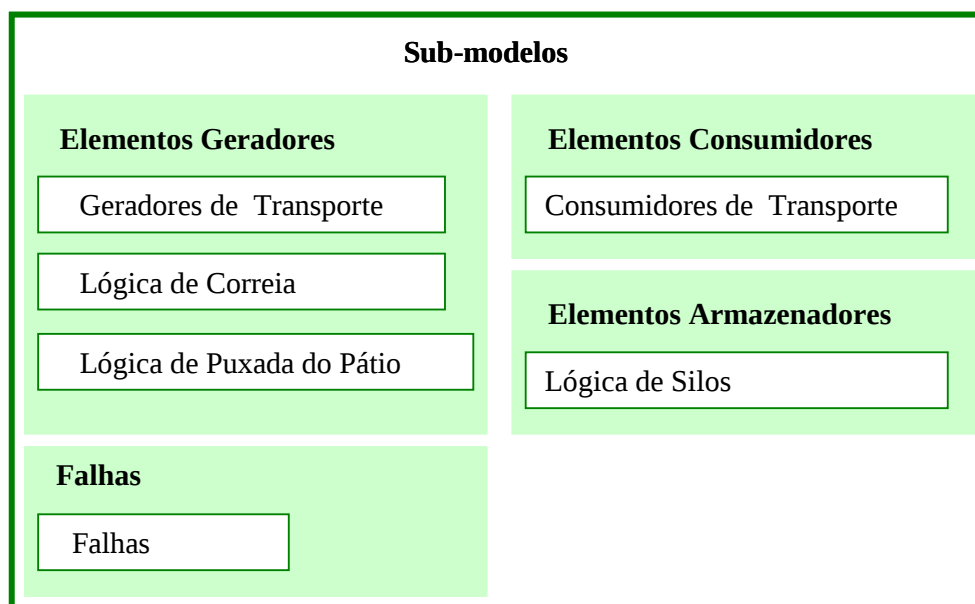


Figura 15 – Sub-modelos do simulador do pátio de matérias-primas.

- **Módulo de geração de matérias-primas (Elementos geradores):** é responsável por detectar a necessidade de uma matéria-prima em determinado local, identificar um ponto de fornecimento deste material e fazer sua requisição de transporte. Subdividido em:
 - **Geradores de transporte:** reúnem as chegadas de materiais com origem externa ao processo, como virador de vagões e *hopper* rodo-ferroviário;
 - **Lógica de correia:** executa as operações de ocupação e liberação das rotas e correias transportadoras em uso pelo processo;

- **Lógica de puxada do pátio:** representa todas as situações em que se necessita retirar material do pátio para envio para os setores consumidores.
- **Módulo de transporte (Elementos consumidores):** representa o sistema de transporte que liga os pontos de origem aos pontos de destino.
 - **Consumidores de transporte:** recebe o pedido de transporte do módulo de fornecimento e consumo, e deve ser capaz de identificar qual a rota de correias capaz de levar o material do ponto de origem ao ponto de destino.
- **Elementos armazenadores:** representa o sistema de silos de todos os setores consumidores do sistema.
 - **Lógica de silos:** executa as operações de pedido e consumo de todos os silos do sistema.
- **Falhas:** controla a ocorrência de paradas dos equipamentos do sistema.

O restante dos elementos na área de trabalho são representações de animação para visualização do *status* do processo. Estas animações foram elaboradas com elementos dinâmicos do *software* Arena sobre imagens das próprias telas do sistema supervisor do pátio de matérias-primas, de forma que sua compreensão seja facilitada.

4.2.1.1 Elementos geradores

4.2.1.2 Geradores de transporte

Este sub-modelo reúne a lógica de todos os recebimentos externos de matérias-primas, ou seja, *hopper* rodo-ferroviário, virador de vagões, e correia transportadora de pelotas da VALE/ AMT.

- **Hopper rodoviário**

O recebimento de materiais pelo *hopper* rodoviário é representado pela lógica mostrada na **Figura 16**.

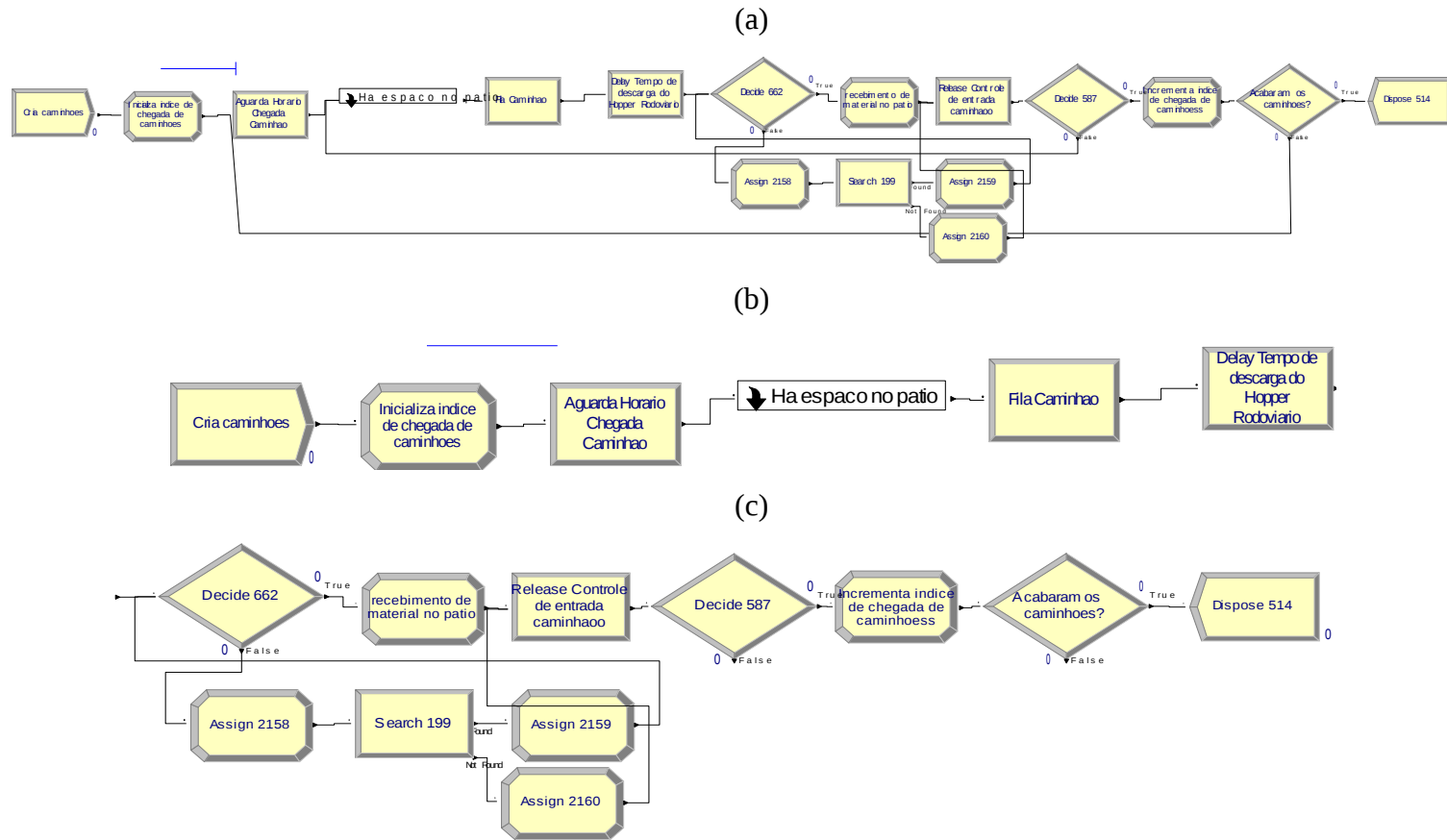
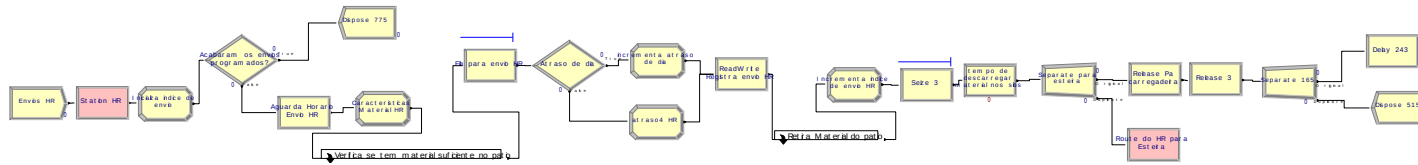


Figura 16 – Recebimento de matérias-primas pelo *hopper* rodoviário: a) lógica completa do *hopper* rodoviário, b) e c) trecho da lógica do *hopper* rodoviário.

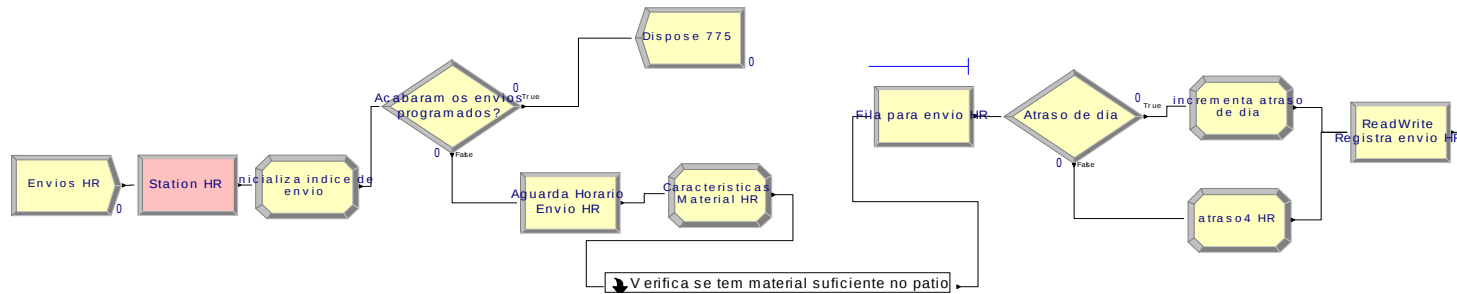
As informações desta seção são gravadas na variável “v_IN_ChegCamHopper”. Uma única entidade é criada e permanece em *loop*, aguardando o momento de uma chegada programada de caminhão. Quando esse momento chega, a entidade segue adiante representando o caminhão programado para chegar, incluindo suas características como tipo de material, quantidade, etc. A matéria-

prima transportada pelo *hopper* rodoviário é consumida pela lógica apresentada na **Figura 17** Erro! Fonte de referência não encontrada., que organiza os envios baseado na disponibilidade das rotas para envio dos lotes até o seu destino (geralmente o pátio primário).

(a)



(b)



(c)

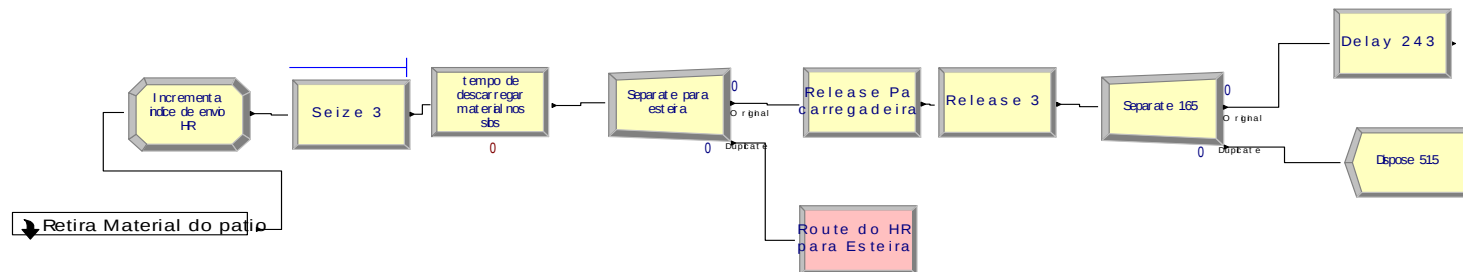
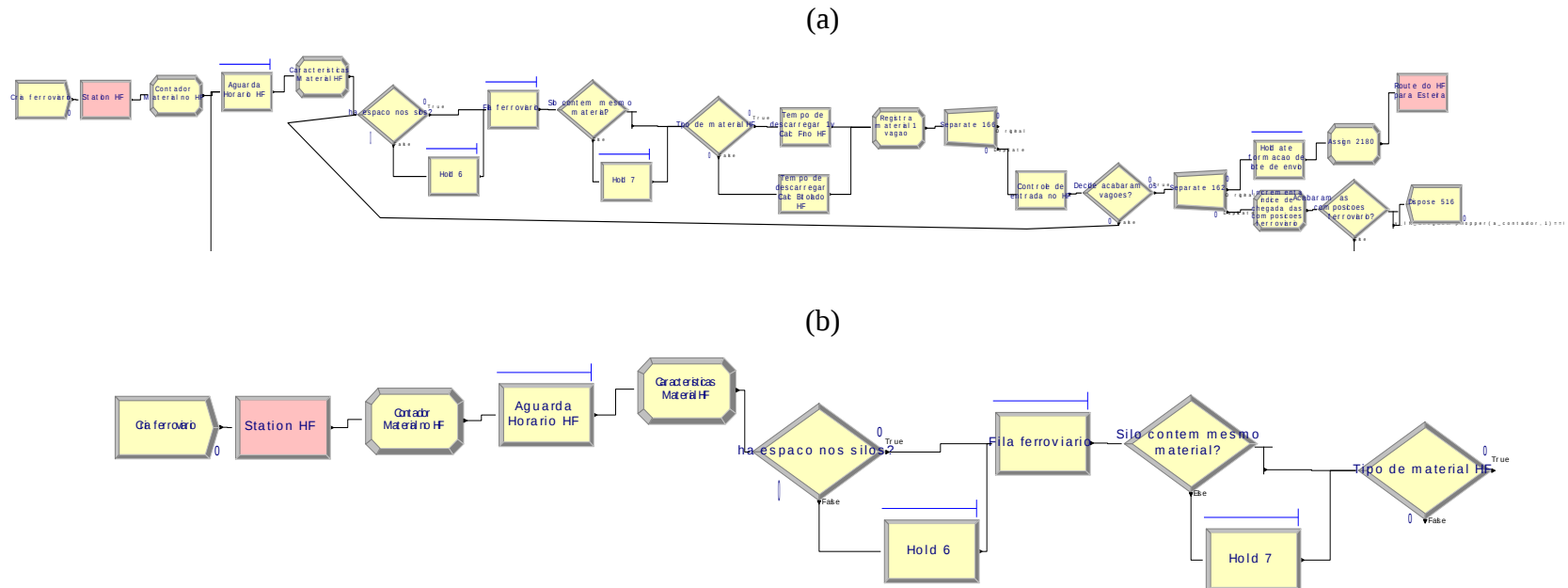


Figura 17 – Consumo de matérias-primas oriundas do *hopper* rodoviário: a) lógica completa de consumo do *hopper* rodoviário, b) e c) trecho da lógica de consumo do *hopper* rodoviário.

Esta lógica também se constitui de uma única entidade em *loop*, que aguarda a presença de matérias-primas (fundentes) nas tremonhas do *hopper* rodoviário.

- **Hopper ferroviário**

O recebimento de materiais pelo *hopper* ferroviário é representado pela lógica apresentada na **Figura 18**.



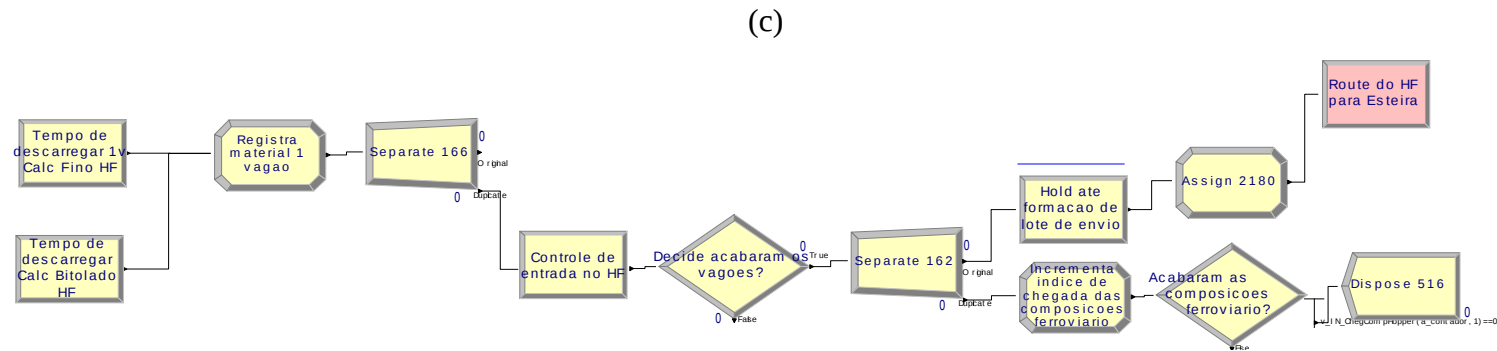
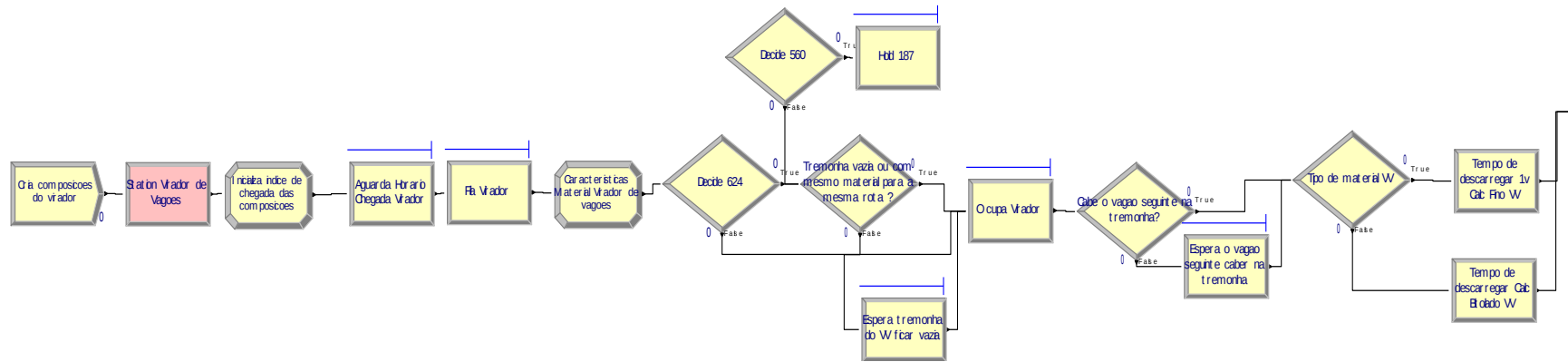


Figura 18 – Recebimento de matérias-primas pelo *hopper* ferroviário: a) lógica completa do *hopper* ferroviário, b) e c) trecho da lógica do *hopper* ferroviário.

Assim como a do *hopper* rodoviário, nesta lógica é usada uma única entidade que fica em loop e cria um trem sempre que o a simulação alcança o horário de chegada programado pelo usuário na interface. Essa programação é lida pelo Software Arena e gravada na variável “v_IN_ChegCompHopper”. Cada composição é descarregada respeitando-se limitações como espaço na tremonha e evitando-se misturar materiais diferentes.



(c)

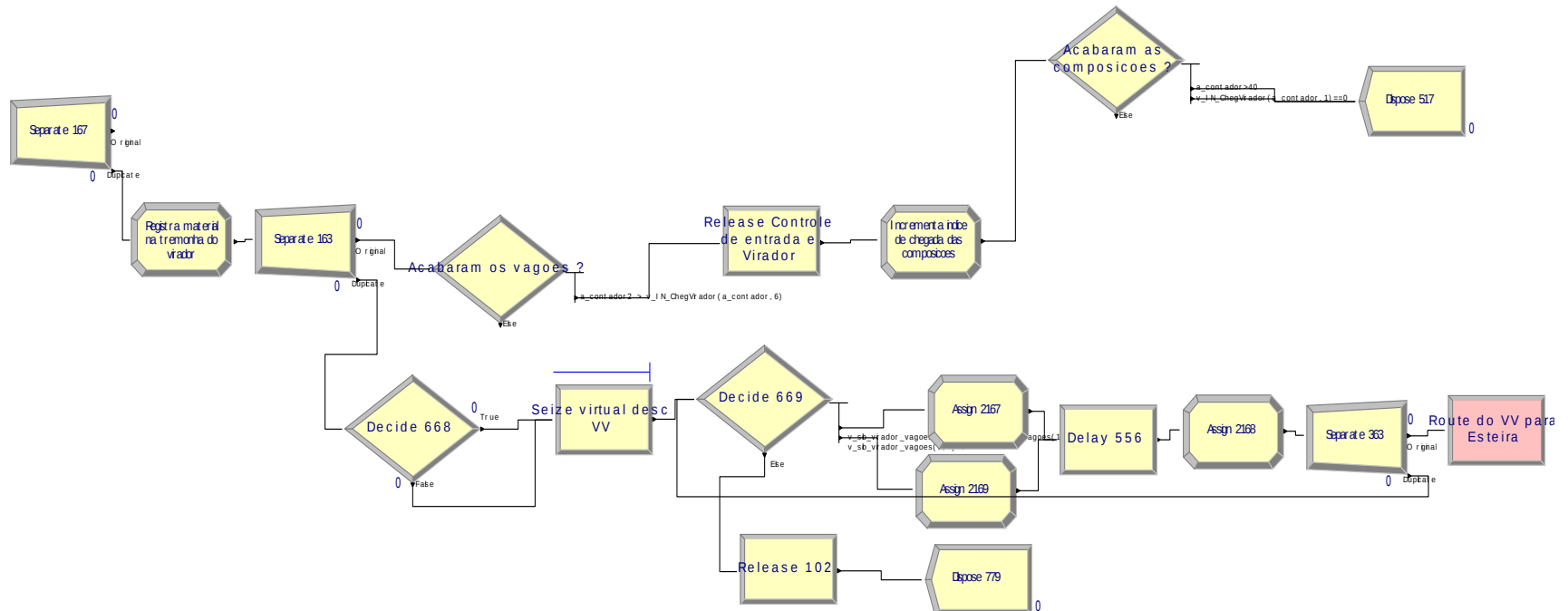


Figura 19 – Lógica de funcionamento do virador de vagões: a) lógica completa do virador, b) e c) trecho da lógica do virador de vagões.

Para cada entidade (composição) que chega, acontece uma subdivisão em entidades (vagão), que são descarregadas individualmente na tremonha, representada por uma variável. Cada vagão descarregado gera uma solicitação de transporte. As solicitações de transporte são atendidas pela lógica de correias. Ao realizar o transporte, o material da tremonha é retirado, permitindo que mais vagões sejam descarregados.

As lógicas de recebimento têm elementos em comum. Uma vez realizado o recebimento do material em qualquer caso, uma cópia da entidade é enviada para um módulo *read/ write* que registra o evento de envio no arquivo de *log*. Também em todos os casos,

quando o lote de envio está pronto para ser enviado, a entidade segue através de rota com tempo zero para a lógica de envio, localizada no sub-modelo “Lógica de Correia”.

- **Correia transportadora de pelotas**

A lógica que representa a chegada de materiais pela correia transportadora de pelotas está apresentada na **Figura 20**.

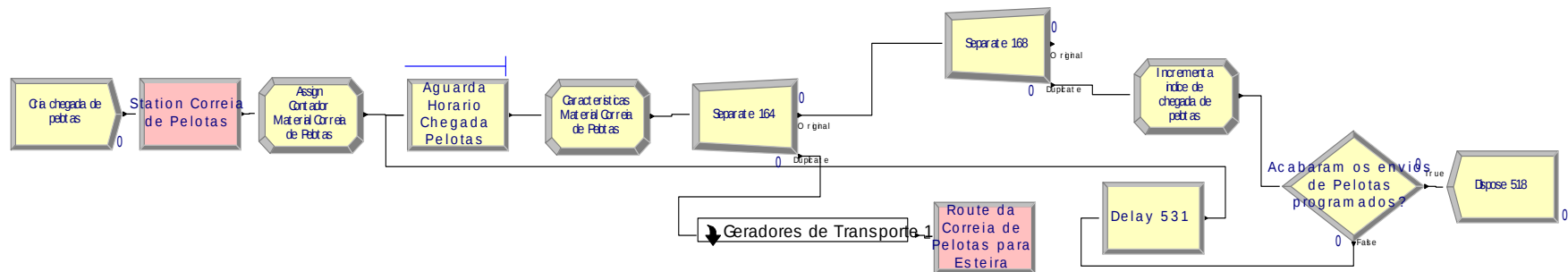


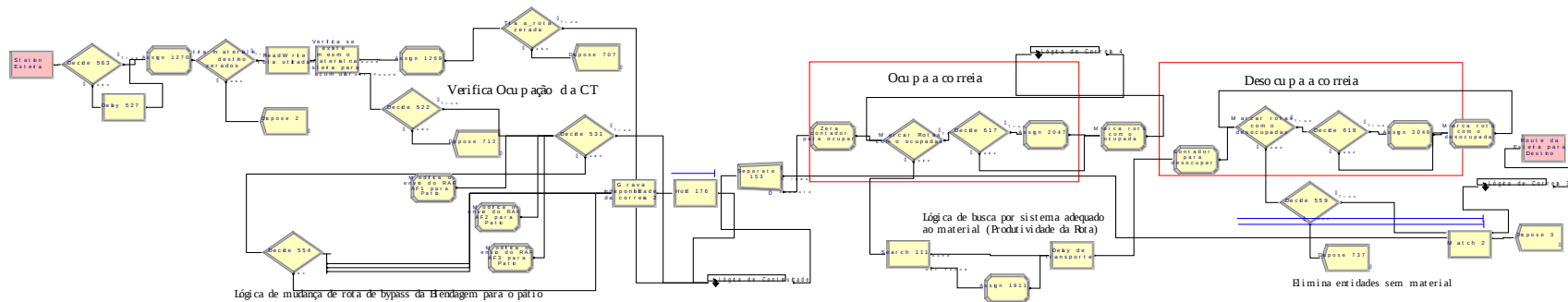
Figura 20 – Lógica de funcionamento da correia transportadora de pelotas.

Sua estrutura é semelhante à das outras chegadas, só que mais simples, pois não necessita verificar equipamentos de recebimento nem espaço de tremonhas. A entidade que fica em *loop* segue a programação de chegadas de materiais. No momento programado para a chegada, a entidade é diretamente encaminhada para a lógica de correias. Apesar do nome “lógica de correia transportadora de pelotas”, o modelo suporta qualquer tipo de matéria-prima que esteja chegando através desta correia transportadora.

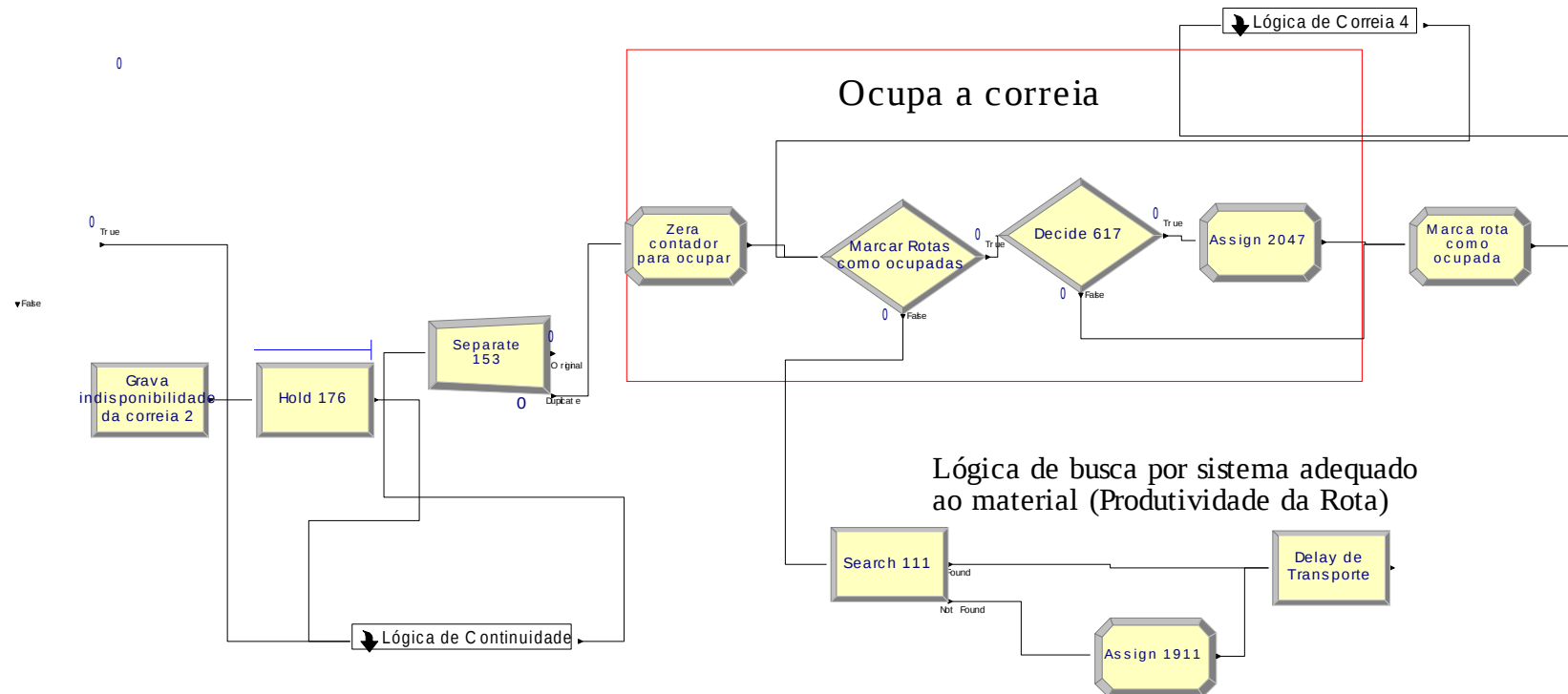
4.2.1.1.1 Lógica de correias transportadoras

Todas as entidades que entram nas correias transportadoras passam por este sub-modelo que endereça as entidades para seus destinos usando as respectivas correias transportadoras, conforme **Figura 21**.

(a)



(c)



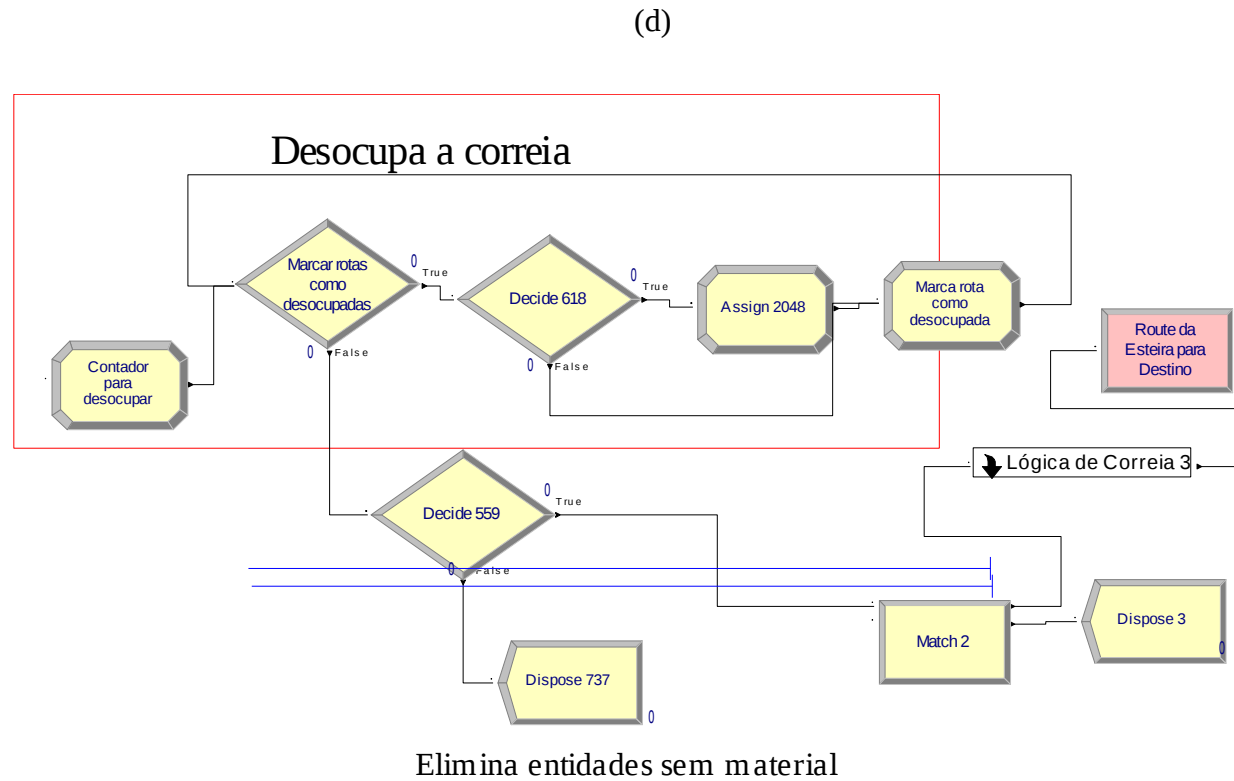


Figura 21 – Lógica de funcionamento das correias transportadoras: a) lógica de correias transportadoras, b), c) e d) trecho da lógica de correias transportadoras.

Esta lógica contém alguns módulos de decisão que verificam a consistência do pedido de transporte em relação às informações do movimento. Esta conferência aparece quatro vezes, verificando todas as entradas do sub-modelo.

A entidade entra no sub-modelo e verifica através de um módulo “search” se existem mais unidades do seu produto para acumular na correia e formar o lote. Formando esse acúmulo de material a entidade vai para o sub-modelo de descritização, descrito a seguir. Quando não há acúmulo, o modelo verifica a disponibilidade da correia no módulo “decide”, esta verificação faz o uso de uma expressão que concentra todas as rotas e seus estados. A expressão resulta em “0” quando há disponibilidade. Quando a rota está indisponível o modelo confere se estas rotas têm o benefício do *by pass*⁹ e com um módulo de *read/ write* é gravada a indisponibilidade da correia, horário, rota, material. Estas unidades ficam a espera da desocupação da correia em um módulo “hold”.

Nos trechos **c)** e **d)** da **Figura 21** da lógica de correias transportadoras, tem-se a lógica de ocupação e desocupação de correias transportadoras, nesta lógica as correias são marcadas como ocupadas quando a variável “v_status_rota” muda de valor. A entidade entra em *loop* para ocupar todas as correias da rota que ela vai percorrer. Quando o *loop* acaba, a entidade passa por um módulo “delay” que passa o tempo do percurso, logo após com um sistema de *loop* parecido o sistema desocupa as correias. Nesta lógica algumas variáveis de controle de peso são atualizadas também.

- **Lógica de correia 3**

A lógica contida neste sub-modelo, conforme a **Figura 22**, verifica quais equipamentos a rota em uso vai utilizar, e marca a utilização deles. Na saída o modelo usa um módulo “route” para sair da *station* correias.

⁹ **By pass** é a operação onde o minério de ferro fino é enviado direto da área de recebimento de matérias-primas para os silos da blendagem, sem passar pelos pátios primários.

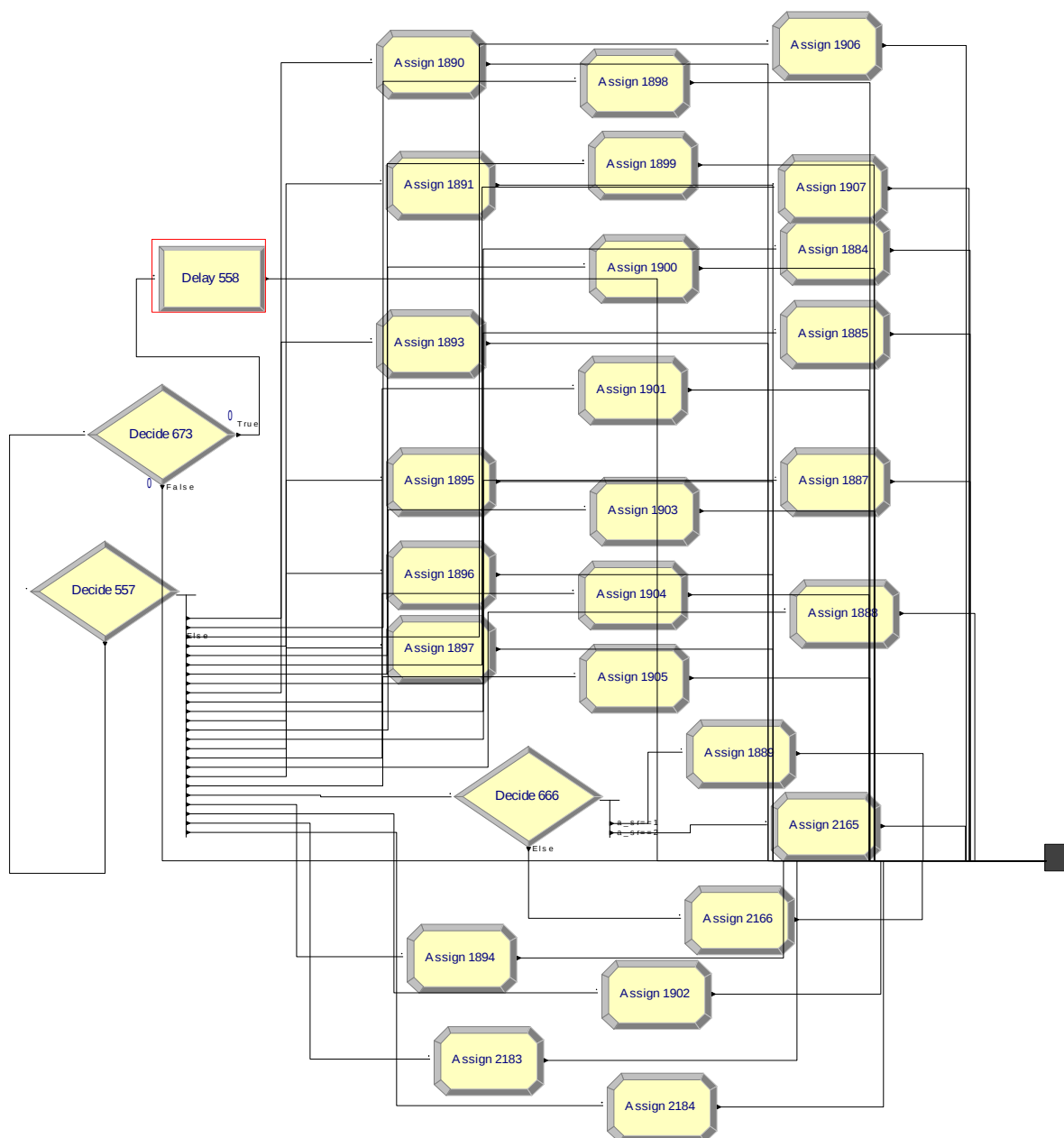


Figura 22 – Lógica de ocupação dos equipamentos.

- **Lógica de discretização**

A lógica apresentada na **Figura 23** é responsável pela discretização do fluxo contínuo nas correias transportadoras. O sistema real de transporte de materiais por correias transportadoras é contínuo, ou seja, a quantidade de material transportado tem relação direta com o tempo decorrido. A proposta do modelo, para fins de simplificação e significativo aumento no seu desempenho, é “discretizar” o envio. Assim, o envio não será constante com a mesma massa ao longo do tempo, mas sim enviados em lotes grandes a intervalos de tempo definidos.

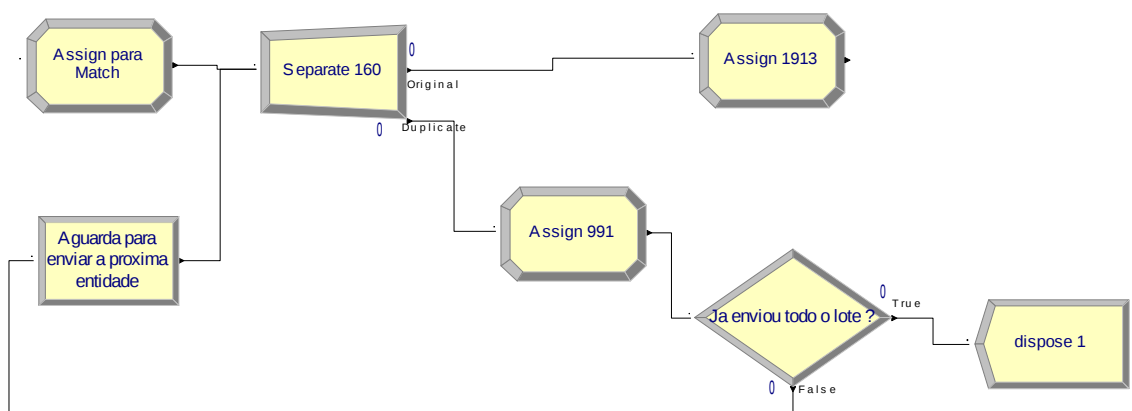


Figura 23 – Lógica de discretização do fluxo contínuo nas correias transportadoras.

O atributo “a_peso” que corresponde ao peso do lote que será enviado é dividido pelo numero de unidades que formaram o lote, então a unidade é copiada e a original sai do sub-modelo e a cópia verifica em um *loop* se a quantidade de unidades que formam o lote foi atendida, caso contrário, a unidade volta e cria outra cópia e assim sucessivamente.

4.2.1.1.2 Lógica de puxada do pátio

Este sub-modelo reúne a lógica de consumo de matérias-primas dos pátios de acordo com o tipo e quantidade necessários destinados aos altos-fornos 1, 2 e 3, sendo que cada alto-forno tem a sua lógica distinta, conforme **Figura 24**.

A lógica se inicia em um módulo “decide”, onde a entidade é direcionada ao seu destino. A partir deste ponto, a entidade é encaminhada para o módulo “search”, que verifica dentre os pátios, qual possui o matéria-prima solicitada, o volume solicitado, e se a pilha em questão está em formação ou em consumo. Após todas as condições satisfeitas, a entidade acessa a *station* esteira, tendo antes decrementado o valor da quantidade de matéria-prima consumida no pátio.

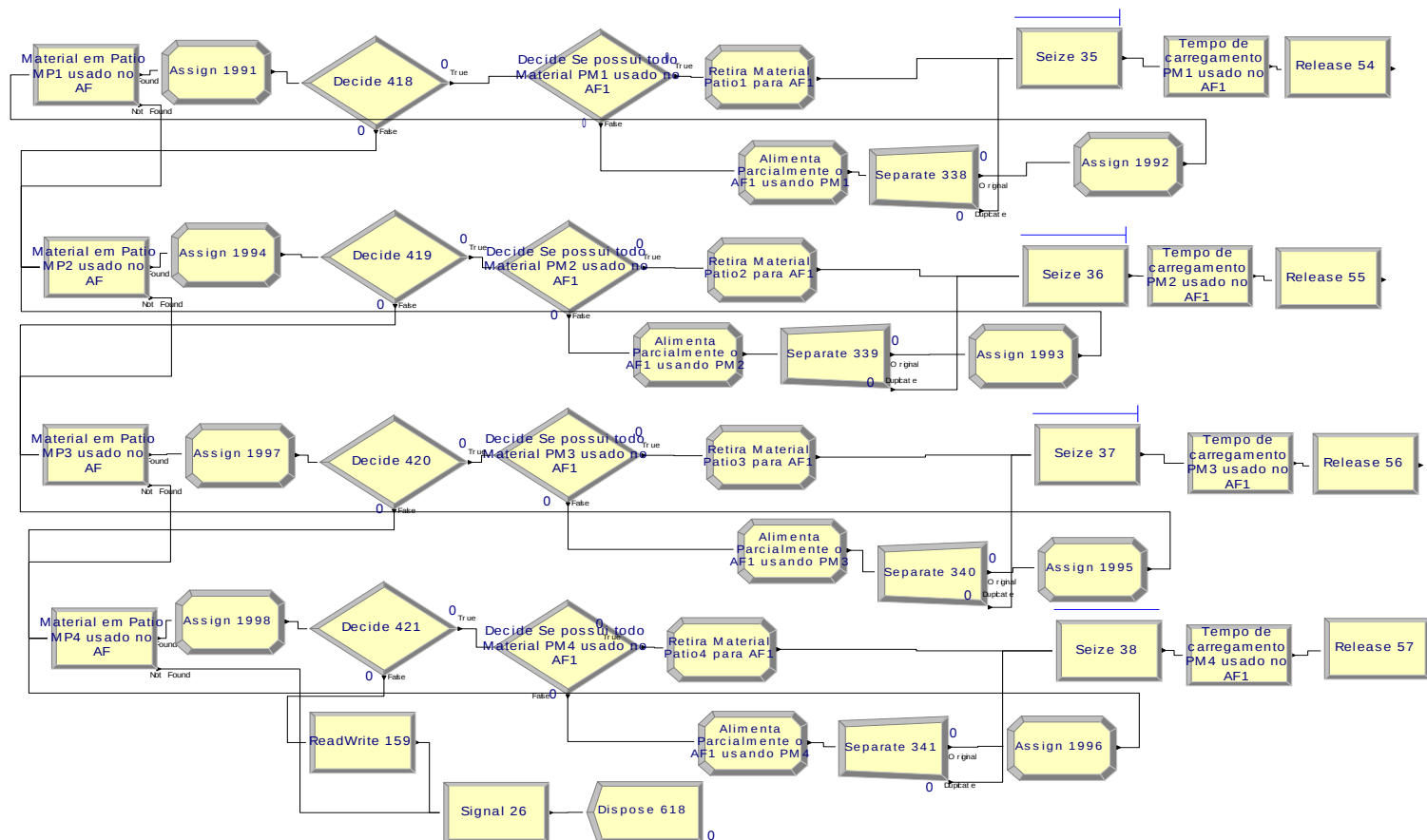


Figura 24 – Lógica de puxada de matérias-primas do pátio para o AF1.

Ainda neste sub-modelo, há a lógica que busca matéria-prima nos pátios a necessidade de consumo da blendagem, conforme **Figura 25**. A lógica que busca nos pátios primários e nos pátios de blendagem a necessidade de matérias-primas destinada à sinterização, conforme **Figura 26**. E também a lógica que verifica a mudança de estado da pilha, ou seja, se a mesma está em consumo ou em formação, conforme **Figura 27**.

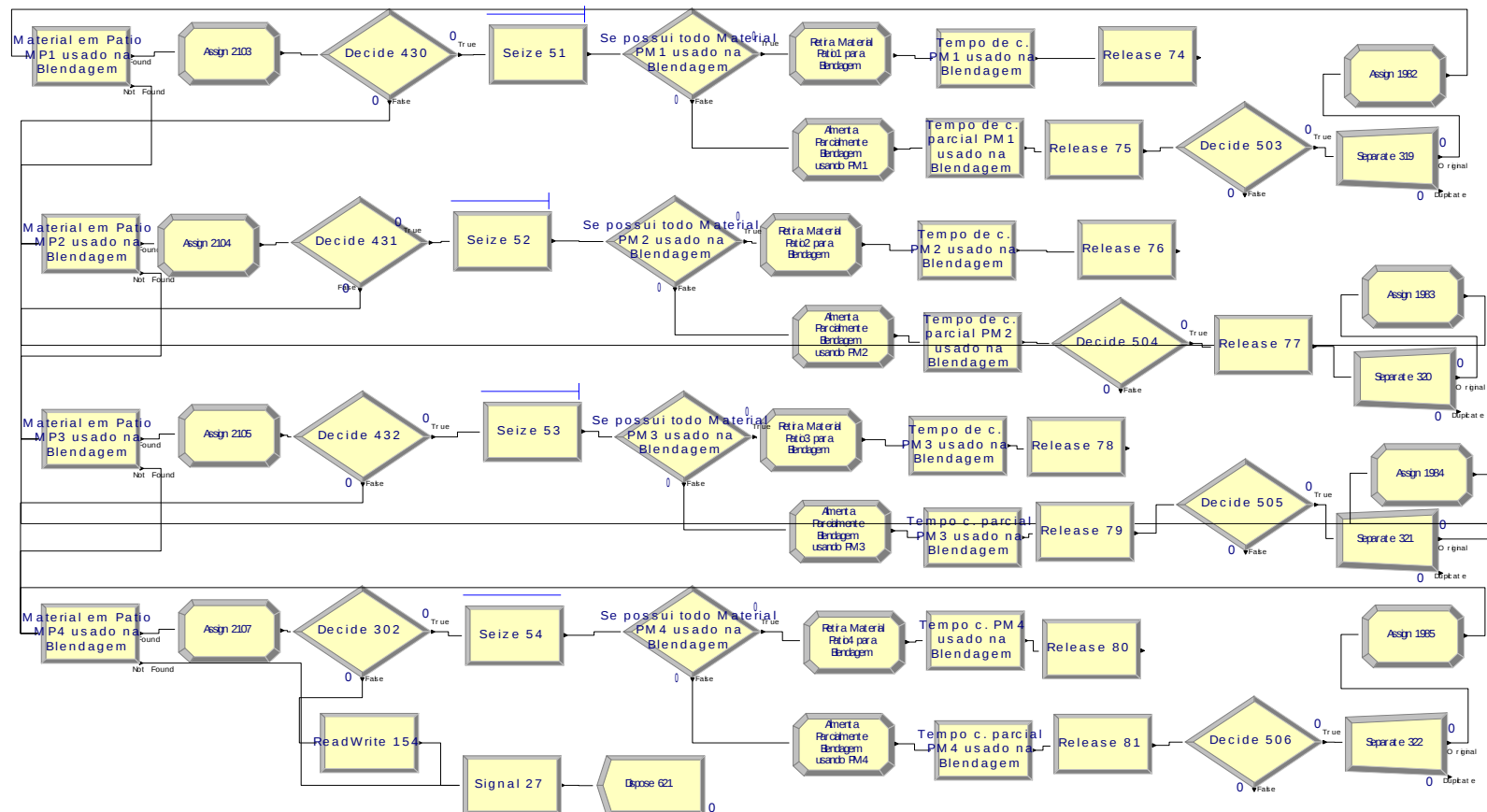


Figura 25 – Lógica de puxada de matérias-primas dos pátios para a blendagem.

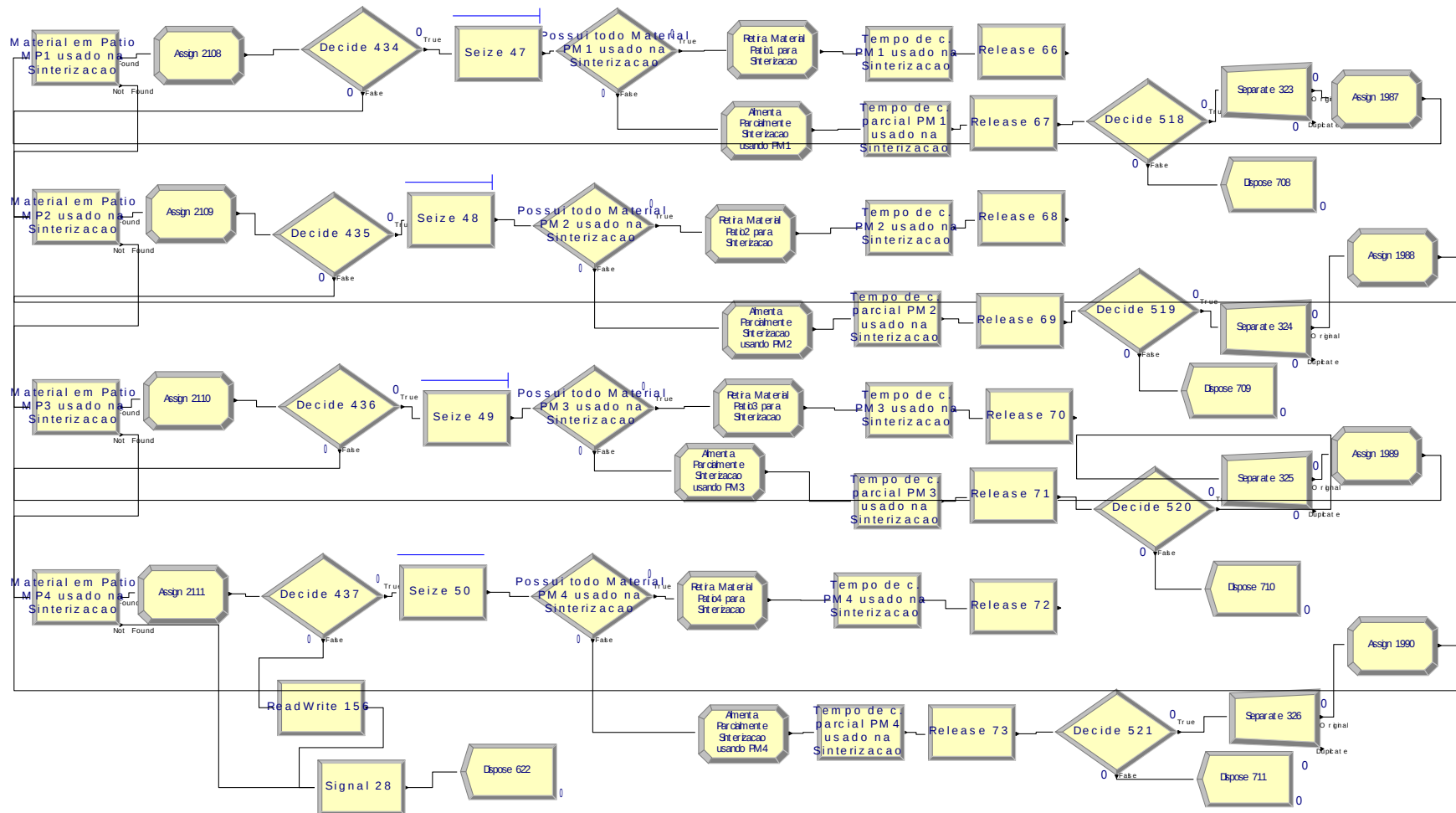


Figura 26 – Lógica de puxada de matérias-primas dos pátios para a sinterização.

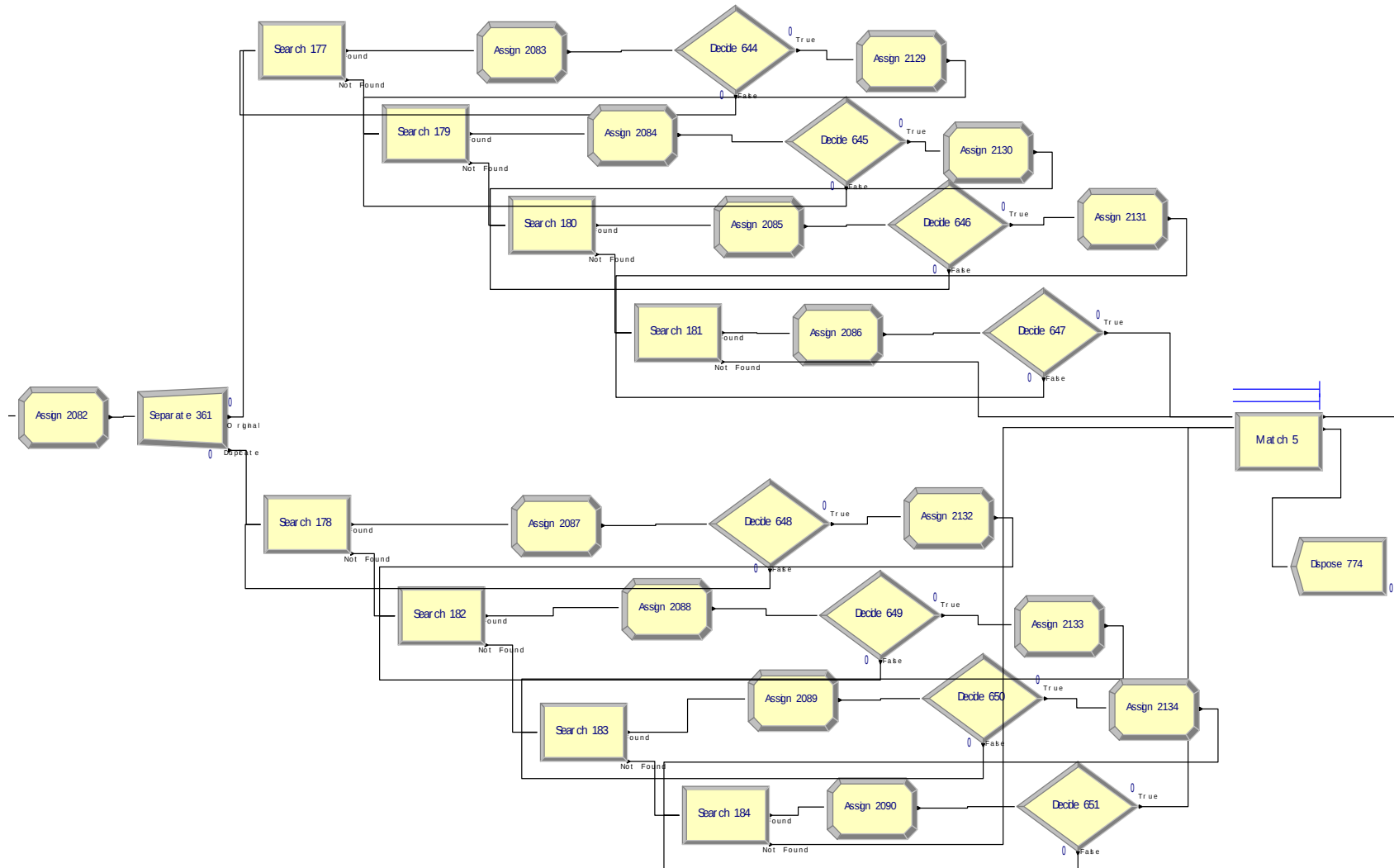


Figura 27 – Lógica que verifica a mudança de estado da pilha de matérias-primas.

4.2.1.2 Elementos consumidores

Contém a lógica do recebimento de materiais em todos os equipamentos, conforme a **Figura 28**. Após percorrerem a lógica das correias, as entidades passam por um módulo “decide”, onde são encaminhadas para os setores consumidores: blendagem, sinterização, pátio de matérias-primas, altos-fornos, calcinação, silos de pelotas, silos de coque ou silos de calcário.

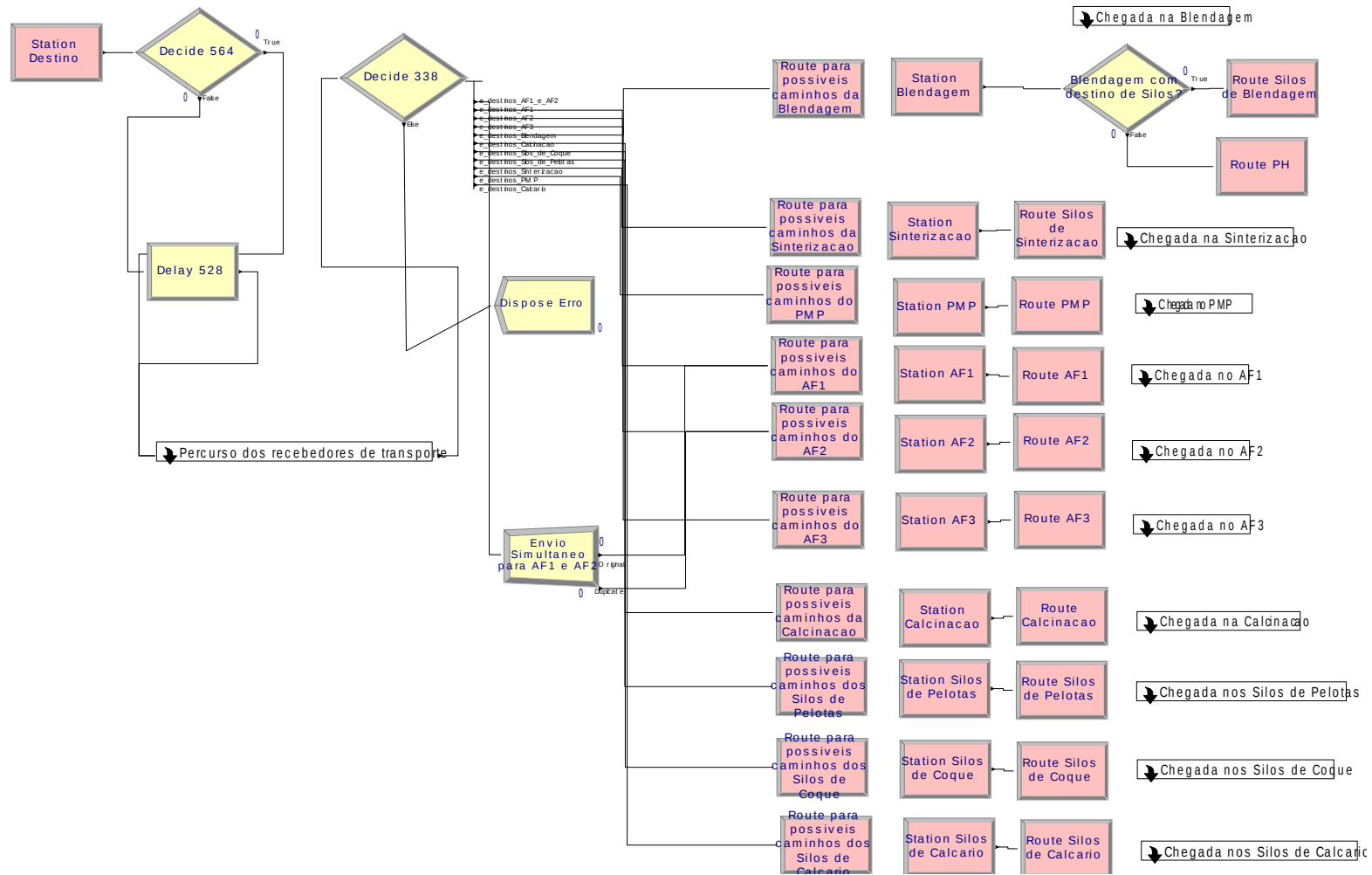


Figura 28 – Lógica de recebimento de matérias-primas dos setores consumidores.

- **Lógica de recebimento de matérias-primas na blendagem**

Na lógica de recebimento de matérias-prima na blendagem, apresentada na **Figura 29**, após a verificação de qual dos sete silos da blendagem receberá a matéria-prima, um módulo “assign” incrementa na variável “v_silo_de_blendagem” o atributo “a_peso” e passa por um módulo “signal”, valor que varia de 1 a 7, de acordo com o silo a ser abastecido.

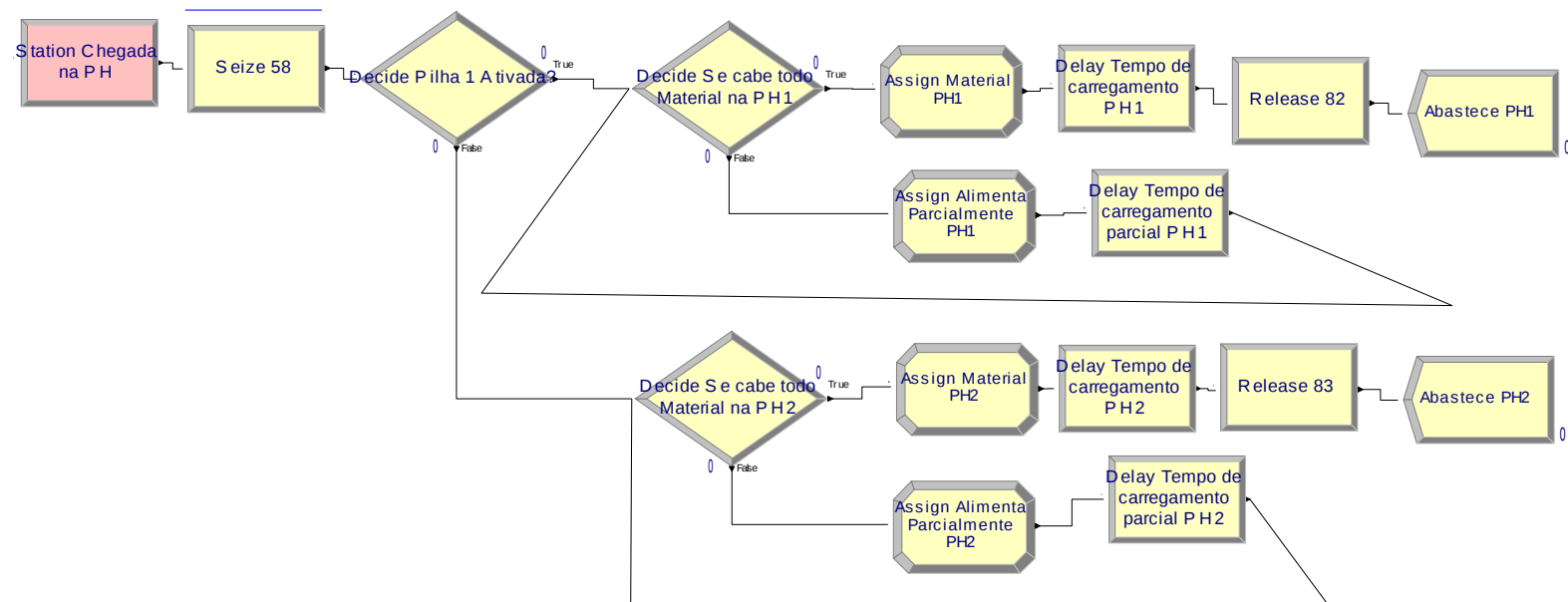


Figura 29 – Lógica de recebimento de matérias-primas da blendagem.

- **Lógica de recebimento de matérias-primas na sinterização**

Na lógica de recebimento de matérias-primas na sinterização, apresentado na **Figura 30**, após a verificação de qual dos doze silos da sinterização receberá material, um módulo “assign” incrementa na “variavel v_silo_de_mistura” o atributo “a_quantidade_pedido” e passa por um módulo “signal”, valor que varia de 1 a 12, de acordo com o silo que será abastecido.

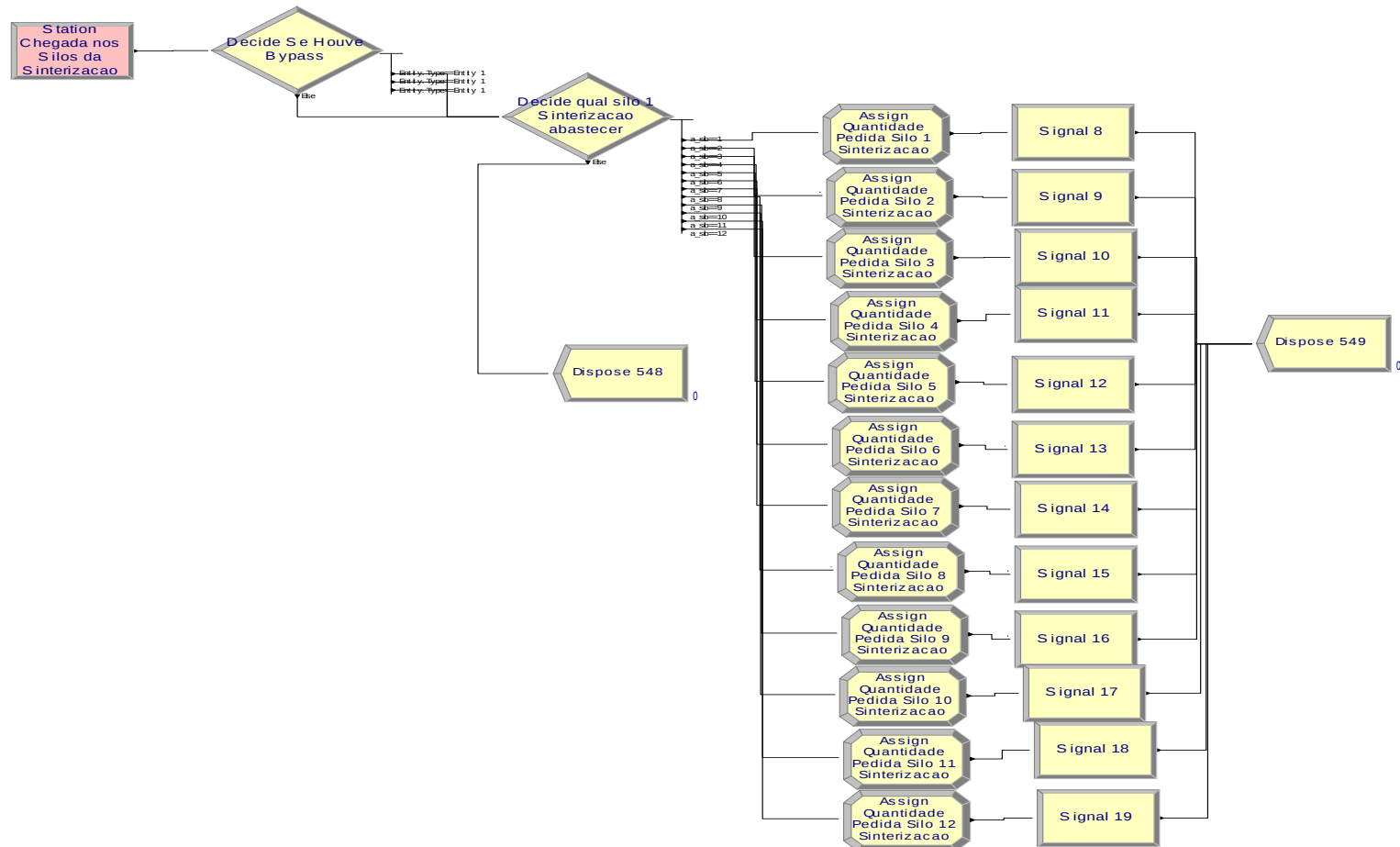


Figura 30 – Lógica de recebimento de matérias-primas da sinterização.

- **Lógica de recebimento de matérias-primas nos pátios**

Na lógica de recebimento de matérias-primas nos pátios apresentado na **Figura 31**, verifica-se que ao chegar ao pátio de matérias-primas, o módulo “seize” é utilizado para a ocupação dos três *stackers reclaimers*. Uma verificação é realizada para saber se o pátio pode receber a matéria-prima e o volume que está sendo enviado.

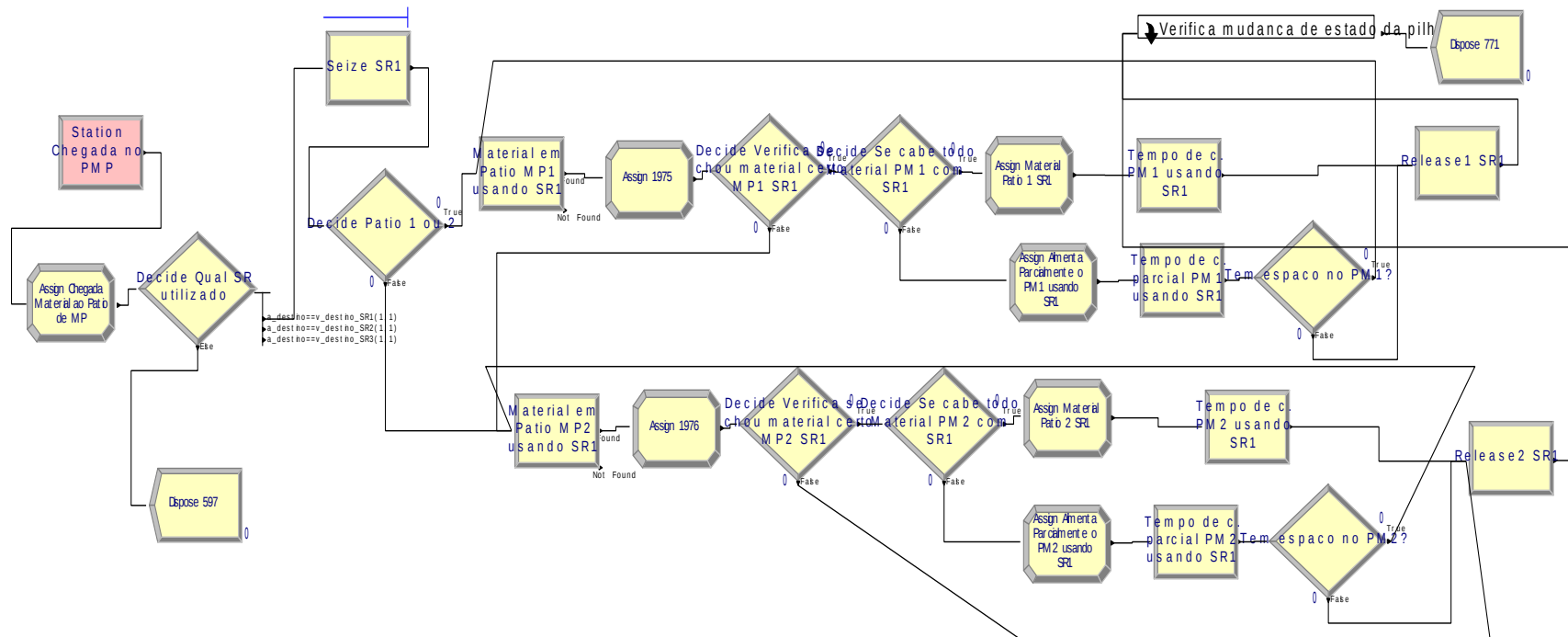


Figura 31 – Trecho da lógica de recebimento de matérias-primas dos pátios primários.

- **Lógica de recebimento de matérias-primas nos altos-fornos**

A chegada de matérias-primas nos altos-fornos é descrita na lógica apresentada na **Figura 32**. Está lógica se repete de forma similar para os três altos-fornos.

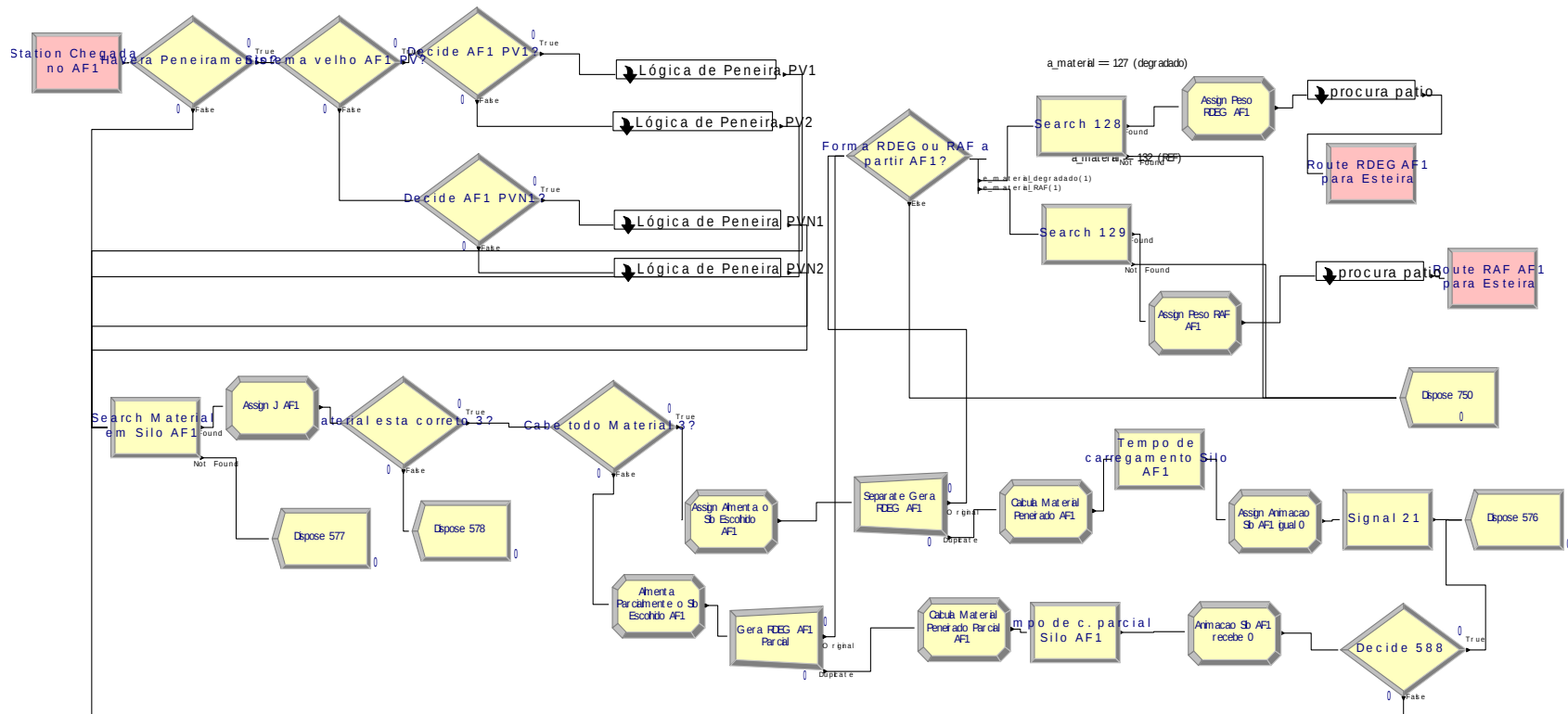


Figura 32 – Lógica de recebimento de matérias-primas nos altos-fornos.

Quando a entidade que representa o material chega ao sub-modelo, o fluxo é dividido em duas partes iguais, onde a primeira metade é destinada aos altos-fornos e a segunda metade é destinada às peneiras do sistema. Cada peneira recebe o mesmo numero de entidades. As entidades destinadas aos silos dos altos-fornos, fazem a escolha do silo com menor volume armazenado através do módulo “search”. Este módulo só resulta em “found”, por isso a saída “not found” está ligada a um módulo “dispose”, conforme a **Figura 33**.

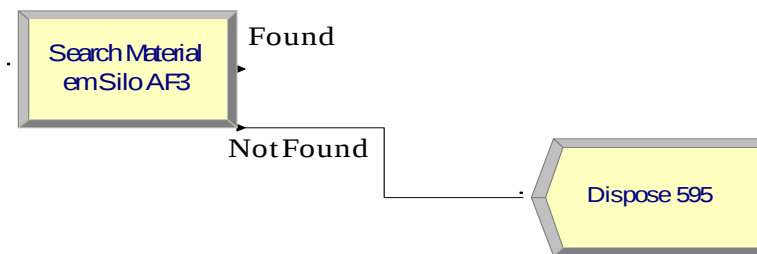


Figura 33 – Trecho da lógica de recebimento de matérias-primas dos altos-fornos.

Na seqüência o modelo verifica a consistência do material que chega, com a do silo. O modelo também verifica se o lote de material que está chegando cabe no silo, se não couber o material faz o carregamento parcial e volta para o módulo “search” de escolha de silo, formando um *loop*. Quando o material está carregando ele passa por um módulo “separate” que cria uma entidade pra passar em um módulo “delay”, que executa o tempo de carregamento do silo. A outra entidade do fluxo entra em um módulo “decide” que marca metade do material de rejeito e a outra metade de retorno de alto-forno (RAF). A marcação de material é feita através do atributo “a_material”, onde o valor 132 é o RAF e o número 127 é o rejeito.

No sub-modelo de peneiramento, que é semelhante para cada peneira, a entidade chega a um módulo “seize” que ocupa o recurso da peneira, passa por um módulo “delay” que determina o tempo de peneiramento, e vai para um módulo “search” que vai escolher o índice da variável “v_peneiras_pv”, que seja correspondente ao material em avaliação, esta lógica é apresentada na **Figura 34**.

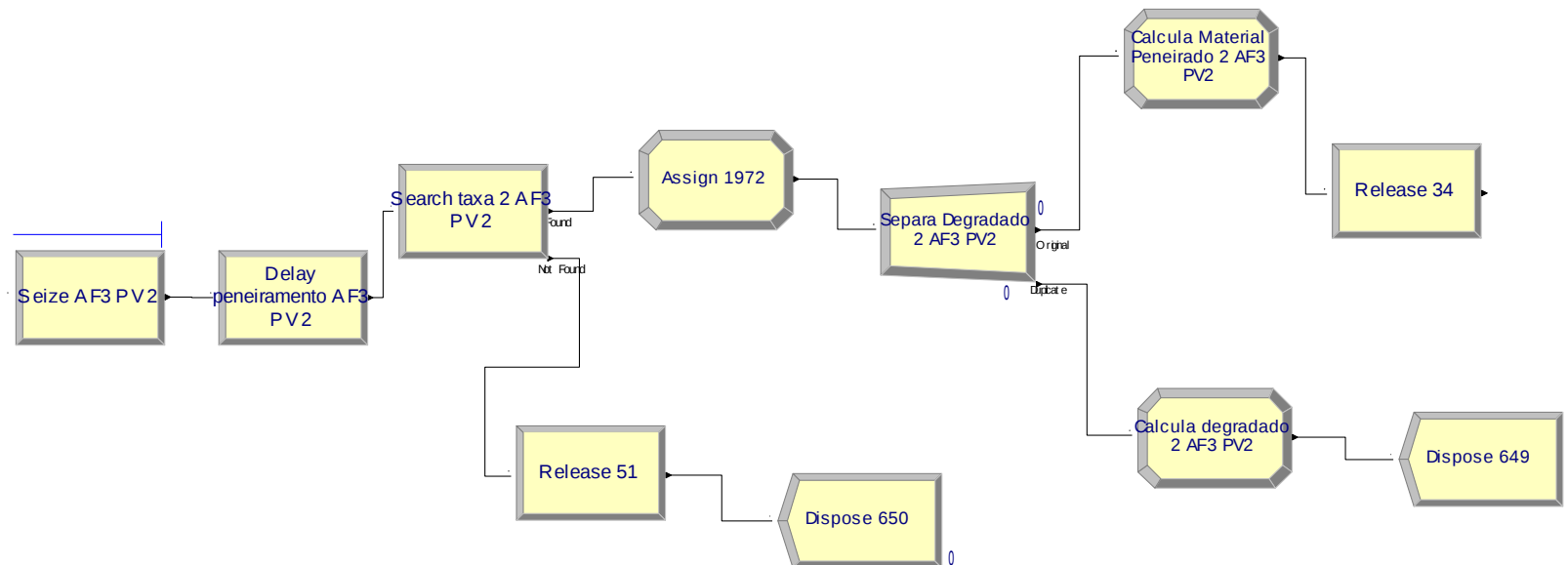


Figura 34 – Lógica de peneiramento nos altos-fornos.

- **Lógica de recebimento de matérias-primas nas calcinações**

Após a chegada à “station” calcinação, conforme a **Figura 35**, um módulo “decide” divide-se em duas metades iguais as entidades que vão para calcinação velha (existente) e para a calcinação nova (construída para atender à expansão da produção). Após a verificação de qual dos dois silos da calcinação velha ou dos dois silos da calcinação nova receberá material, um módulo “assign” incrementa na variável “v_silo_calcario” o atributo “a_quantidade_pedido”.

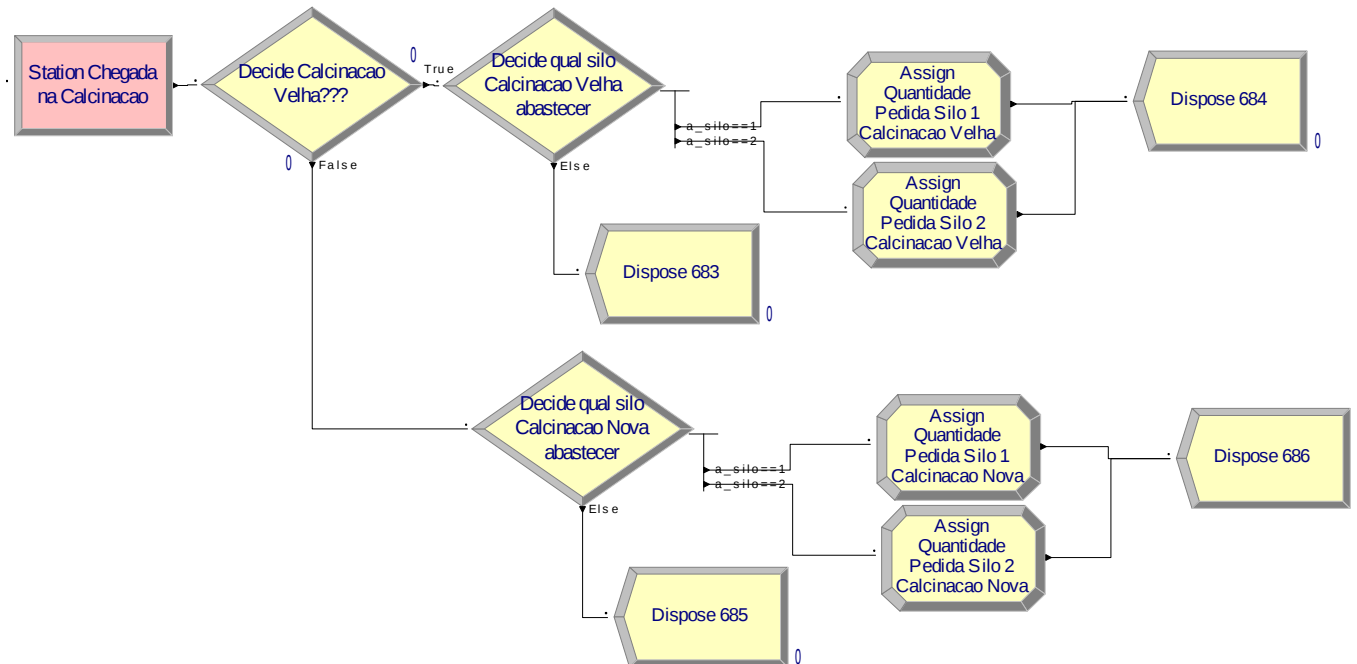


Figura 35 – Lógica de recebimento de matérias-primas da calcinação.

- **Lógica de recebimento de matérias-primas nos silos de pelotas**

Na lógica de recebimento de matérias-primas nos silos de pelotas apresentado na **Figura 36**, após a chegada à “station” silos de pelotas há a verificação de qual dos três silos de pelotas receberá a matéria-prima, um módulo “assign” incrementa na variável “v_silos_pelotas” o atributo “a_quantidade_pedido”, e passa para o módulo “signal”, um valor que varia de 1 a 3, de acordo com o silo que será abastecido.

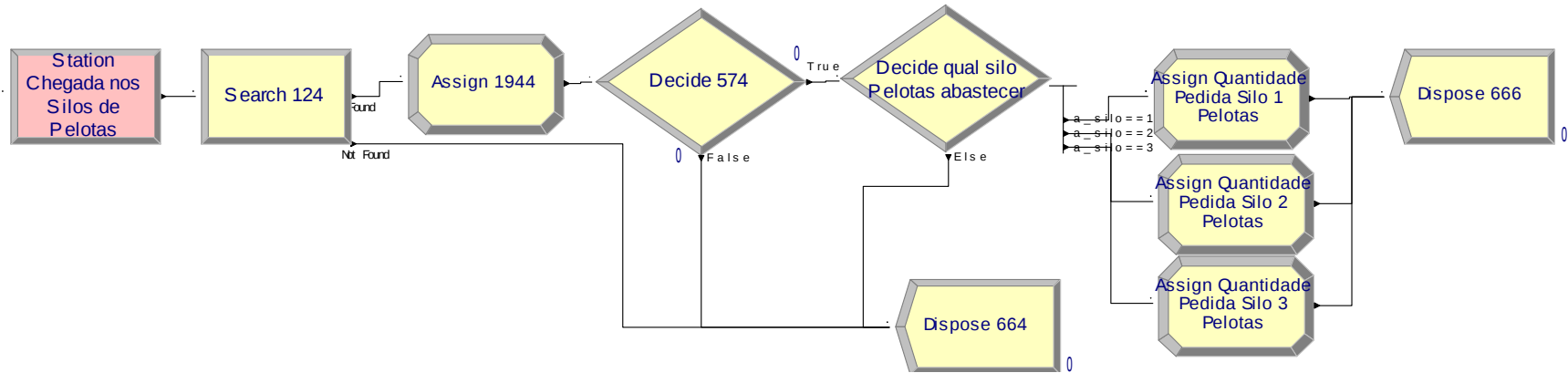


Figura 36 – Lógica de recebimento de matérias-primas dos silos de pelotas.

- **Lógica de recebimento de matérias-primas nos silos de coque**

Na lógica de recebimento de matérias-primas nos silos de coque apresentado na **Figura 37**, após a chegada à “station” silos de coque acontece a verificação de qual dos três silos de coque receberá material, um módulo “assign” incrementa na variável “v_silos_coque” o atributo “a_quantidade_pedido”, e passa para o módulo “signal”, um valor que varia de 1 a 3, de acordo com o silo que será abastecido.

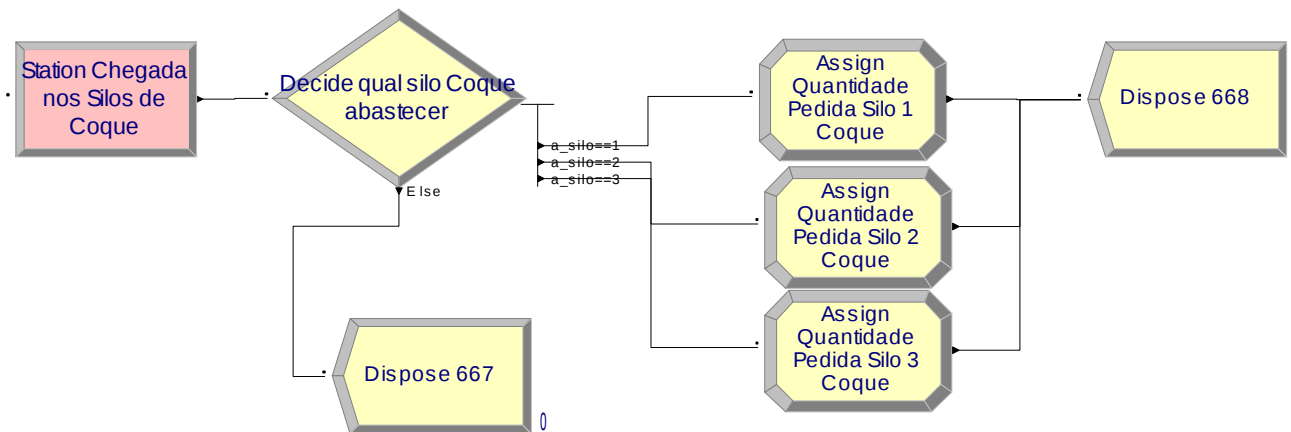


Figura 37 – Lógica de recebimento de matérias-primas dos silos de coque.

4.2.1.3 Elementos armazenadores

Este sub-modelo reúne as lógicas dos silos, sendo responsável pelas operações de pedido e consumo de todos os silos do sistema.

4.2.1.3.1 Lógica de pedido de silos

Esta lógica executa as operações de pedido de matérias-primas de todos os silos dos setores consumidores.

- **Lógica de pedido de silos da blendagem**

A primeira lógica que compõe o sub-modelo lógica de silos, é a lógica de pedidos dos silos da blendagem, conforme **Figura 38**. Em cada um dos sete silos da blendagem, é feita uma verificação através do módulo “hold”, que libera a entidade apenas quando o módulo “signal”, da lógica puxada do pátio, retornar o valor esperado, indicando que o material do pátio foi direcionado para o silo em questão.

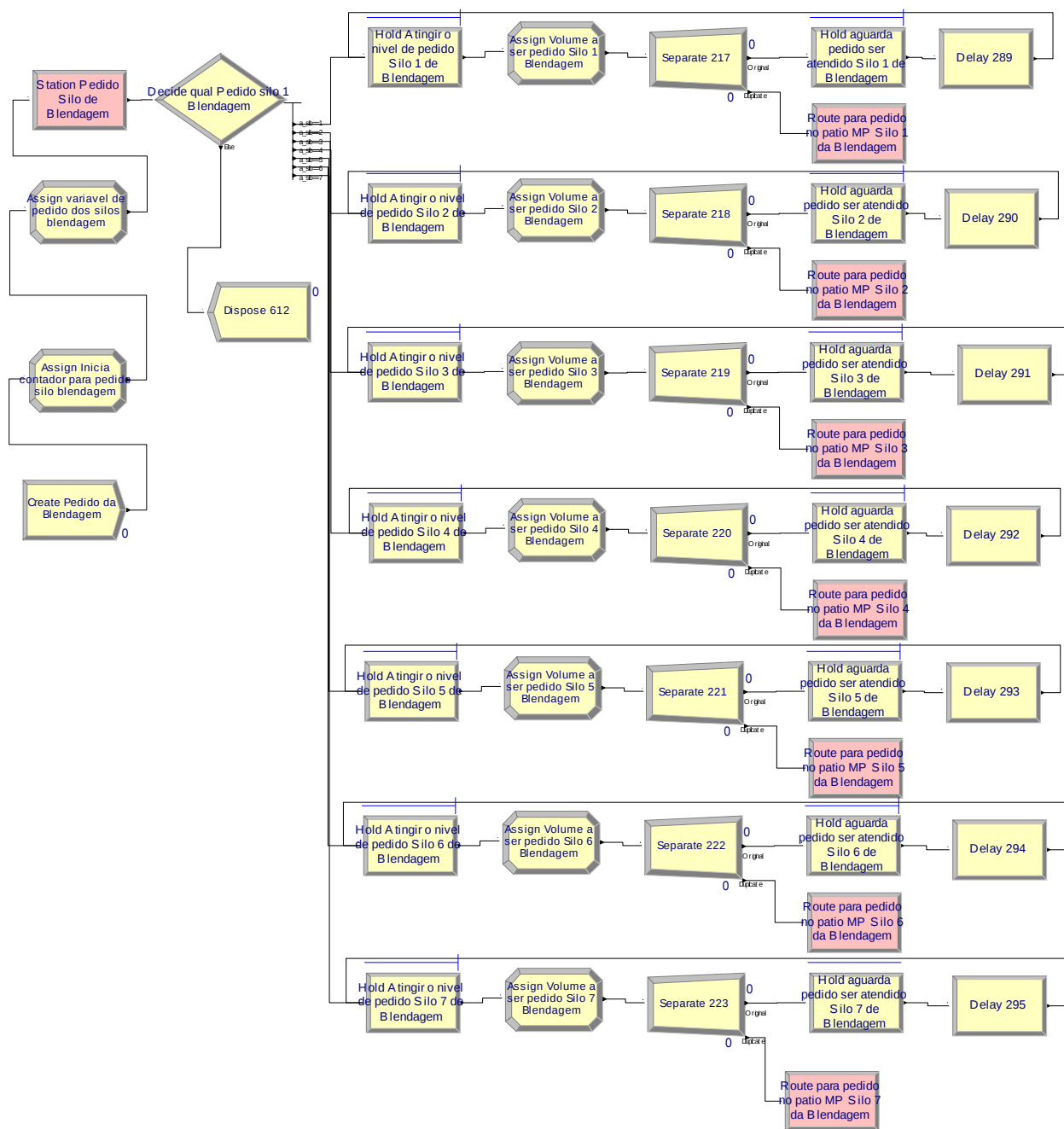


Figura 38 – Lógica de pedido dos silos da blendagem.

- **Lógica de pedido de silos de mistura da sinterização**

Na lógica de pedido de silos de mistura da sinterização, apresentado na **Figura 39**, em cada um dos onze silos de mistura é feita uma verificação através do módulo “hold”, que libera a entidade apenas quando o módulo “signal”, da lógica puxada do pátio, retornar

o valor esperado, indicando que a matéria-prima do pátio primário ou do pátio pilha homogeneizada (PH) foi direcionado para o silo em questão.

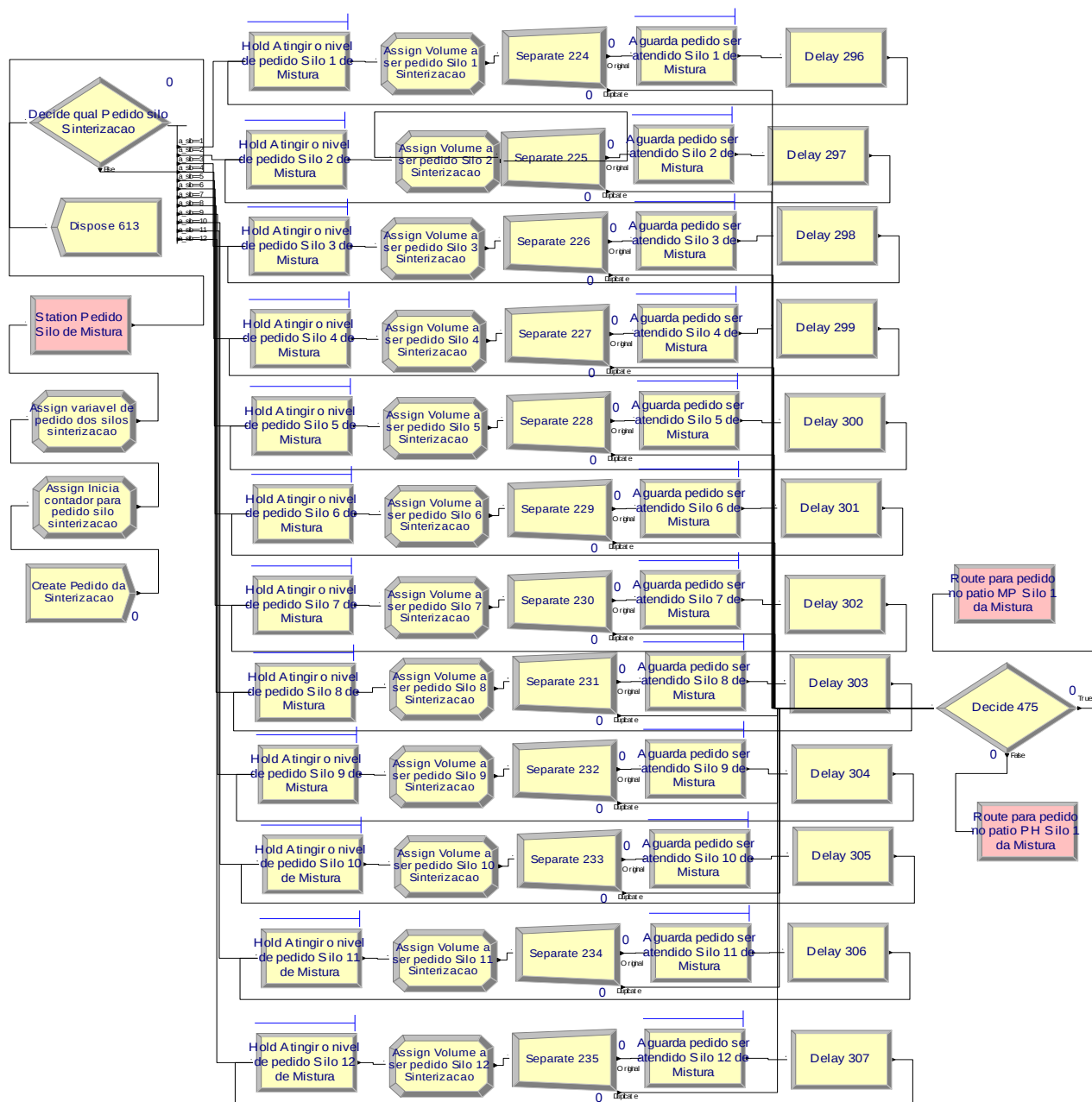


Figura 39 – Lógica de pedido dos silos da mistura da sinterização.

- **Lógica de pedido de silos do alto-forno 1**

Na lógica de pedido de silos do alto-forno 1 (AF1), apresentado na **Figura 40**, em cada um dos dezesseis silos é feita uma verificação através do módulo “hold”, que libera a entidade apenas quando o módulo “signal”, da lógica puxada do pátio, retornar o valor esperado, indicando que o material do pátio foi direcionado para o silo em questão.

Na lógica de pedidos de silos dos altos-fornos 2 e 3, rejeito, descarga de RAF, calcinação velha, calcinação nova e silos de calcário, similar à lógica de pedido de silos do alto-forno 1, é feita uma verificação através do módulo “hold”, em cada um dos silos desses setores consumidores, que libera a entidade apenas quando a quantidade de material, solicitada à lógica puxada do pátio, satisfizer a quantidade pedida pelo silo em questão.

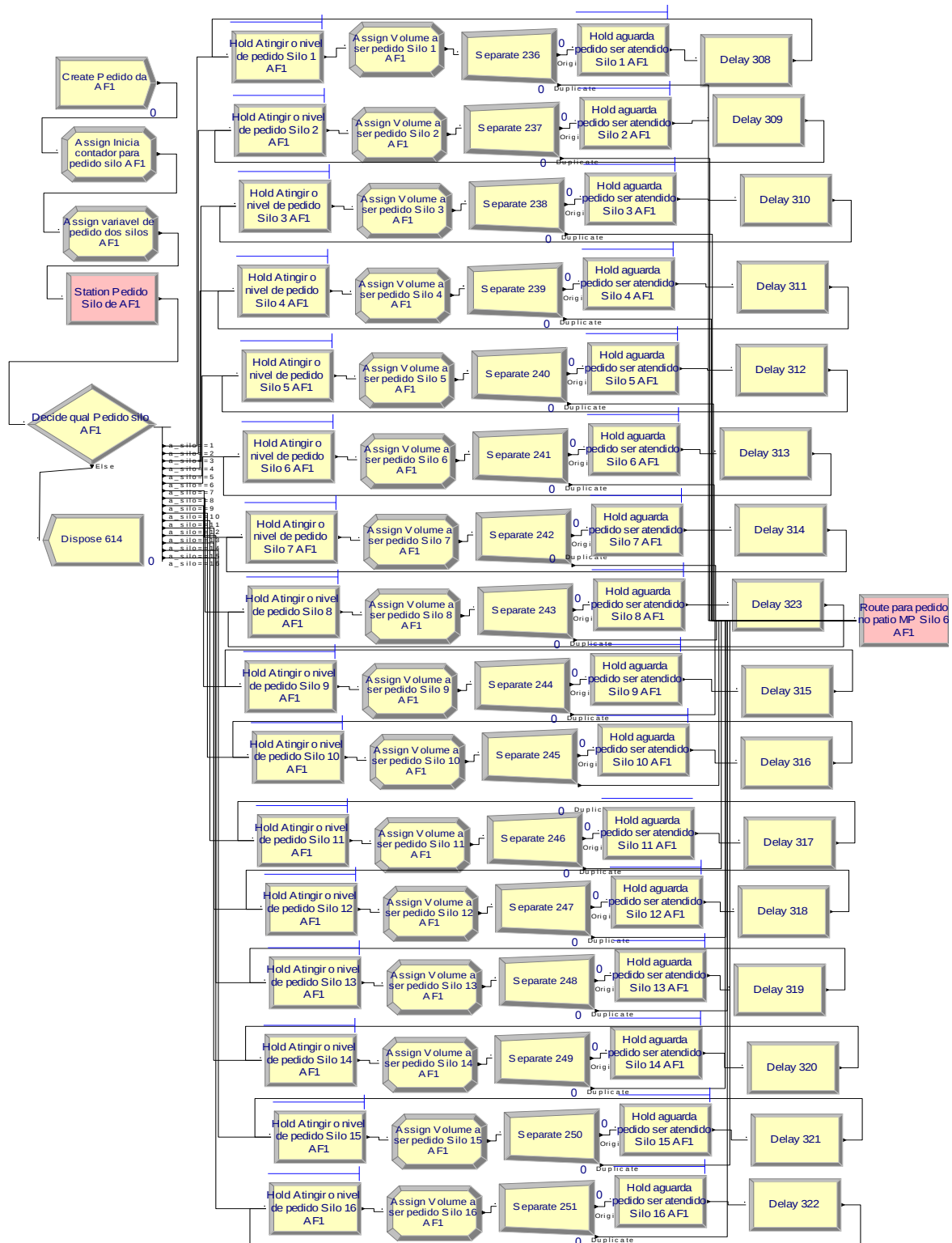


Figura 40 – Lógica de pedido dos silos do AF1.

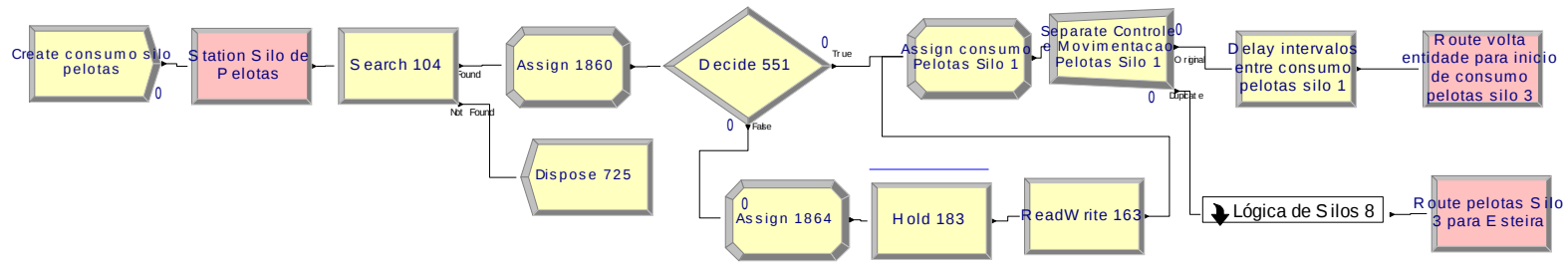
4.2.1.3.2 Lógica de consumo de silos

Esta lógica executa as operações de consumo de todos os silos dos setores consumidores.

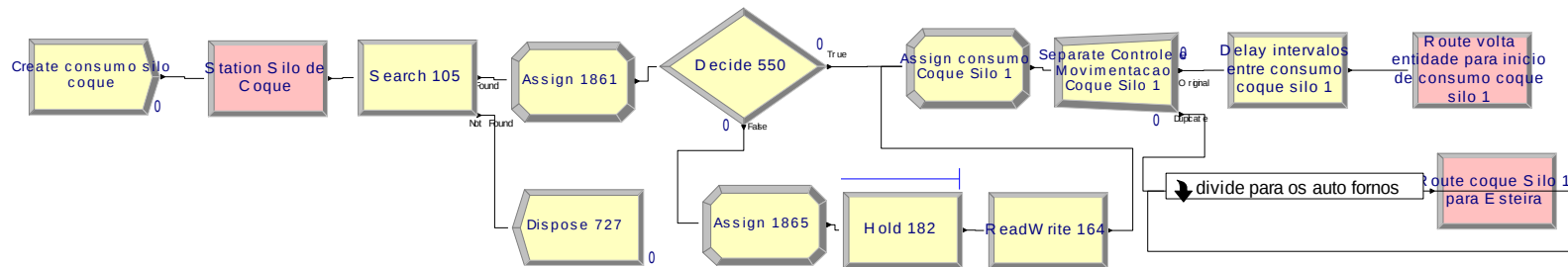
- **Lógica de consumo de silos de pelotas, coque e blendado**

Ao chegar aos silos de pelotas, coque e blendado, conforme a **Figura 41**, através do módulo “search”, é feita uma busca pelo silo que contenha maior nível atual. Uma vez identificado, este silo passa a ser consumido até que seu volume atual seja menor do que o lote de abastecimento.

Consumo silos de pelotas



Consumo silos de coque



Consumo silos da blendagem

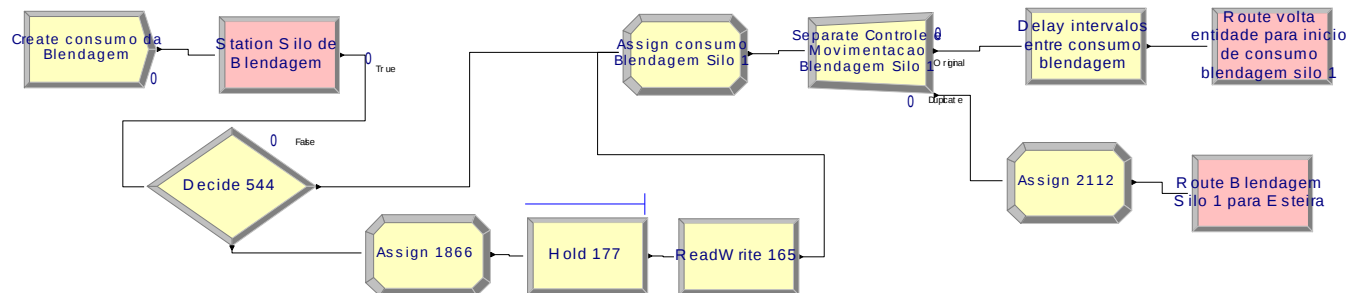


Figura 41 – Lógica de consumo dos silos de pelotas, coque e blendagem.

- **Lógica de consumo dos silos da sinterização (silos de mistura)**

Assim como na lógica apresentada anteriormente, através do módulo “search”, é feita uma busca pelo silo que contenha maior nível atual. Uma vez identificado, este silo passa a ser consumido até que seu volume atual seja menor do que o lote de abastecimento. Cada lote de abastecimento é representado por uma entidade, que passa por um módulo “separate” direcionando-a para a lógica responsável por selecionar o silo que irá receber a quantidade que se encontra na peneira. Está lógica é apresentada na **Figura 42**.

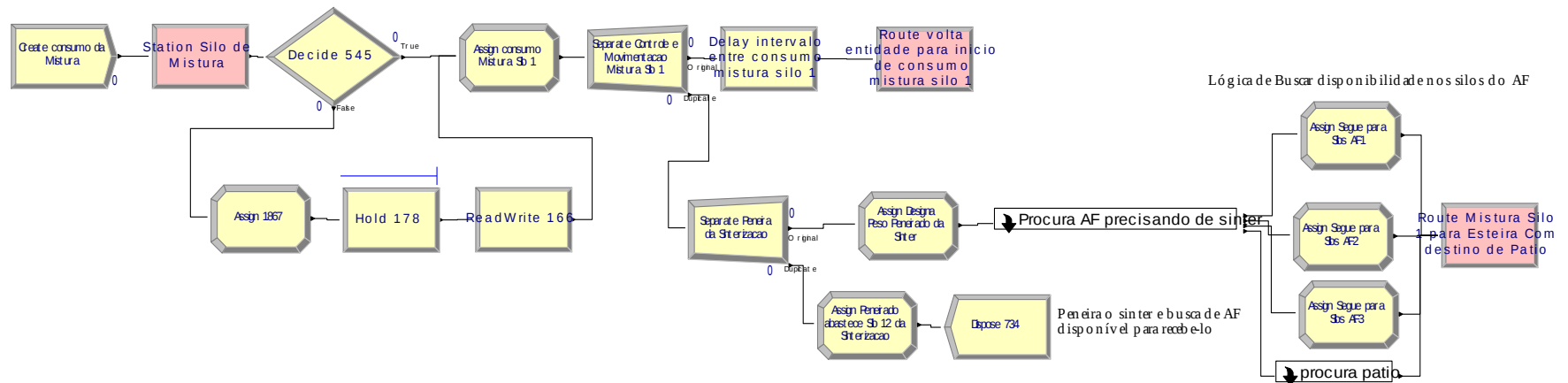
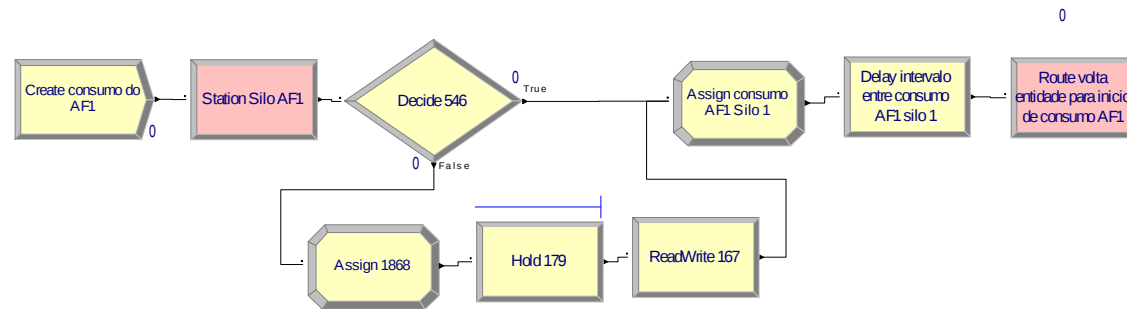


Figura 42 – Lógica de consumo dos silos da sinterização.

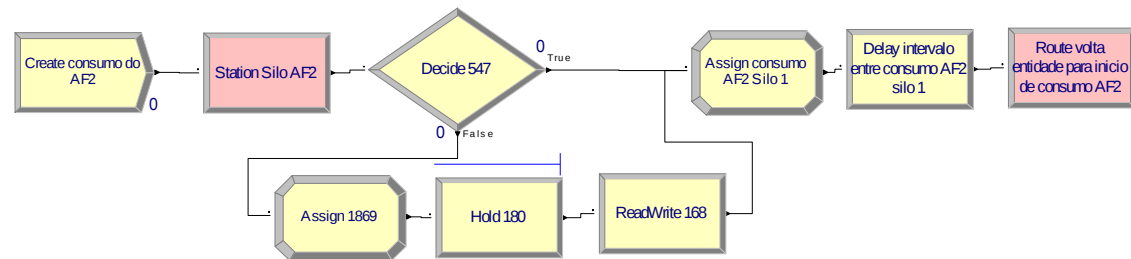
- **Lógica de consumo dos silos dos altos-fornos**

Similar à lógica de consumo dos silos de pelotas, coque e blendagem, através do módulo “search”, é feita uma busca pelo silo que contenha maior nível atual. Uma vez identificado, este silo passa a ser consumido até que seu volume atual seja menor do que o lote de abastecimento. Está lógica é apresentada na **Figura 43**.

a) Silos do alto-forno 1 (AF1)



b) Silos do alto-forno 2 (AF2)



c) Silos do alto-forno 3 (AF3)

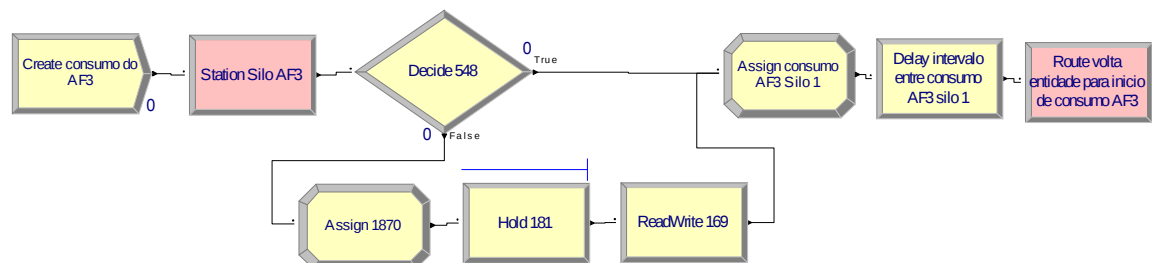


Figura 43 – Lógica de consumo dos silos dos altos-fornos: a) consumo do AF1, b) consumo do AF2, c) consumo do AF3.

- **Lógica de consumo dos silos de rejeitos, dos silos de retorno do alto-forno (RAF) e dos silos de calcário**

Na lógica de consumo dos silos de rejeitos, dos silos de retorno do alto-forno (RAF) e dos silos de calcário, apresentado na **Figura 44**, para cada entidade que passa por ela, ocorre o acúmulo do valor do lote de abastecimento ao silo de menor volume atual.

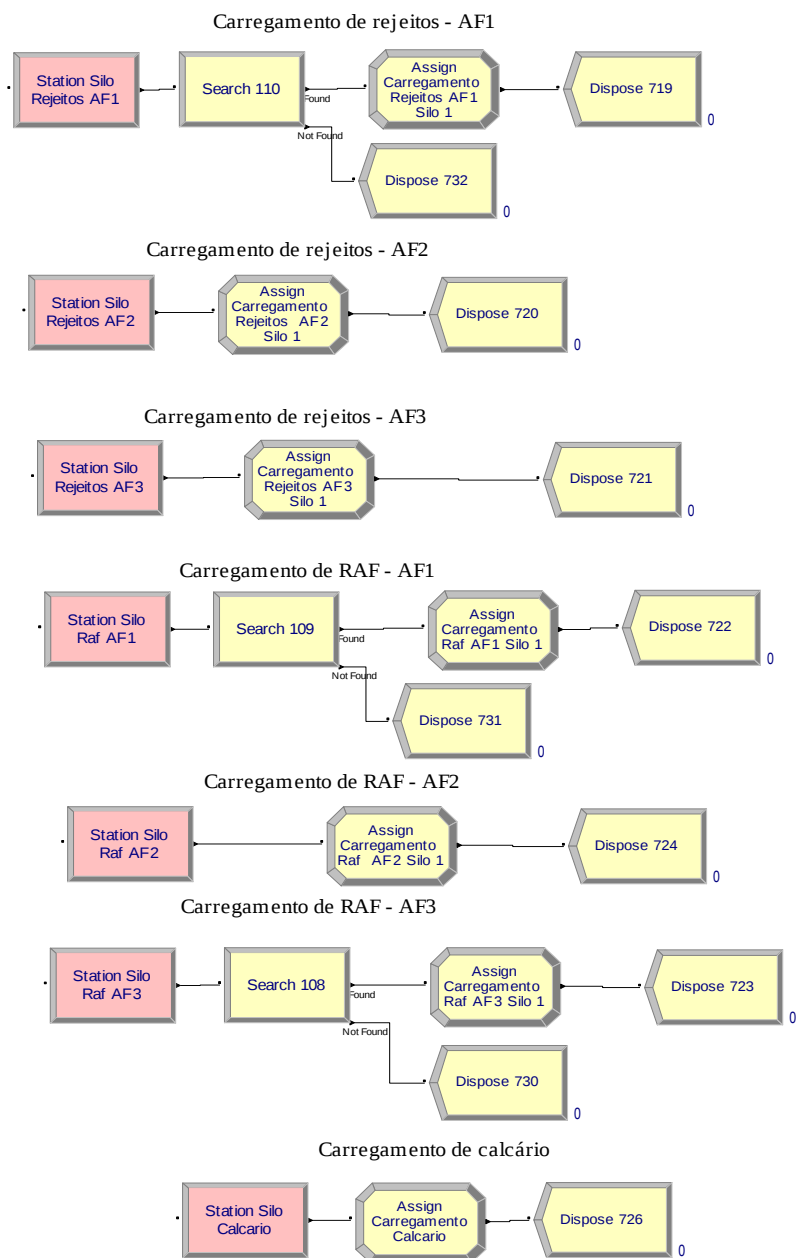


Figura 44 – Lógica de consumo dos silos de rejeitos, dos silos de RAF e dos silos de calcário.

- **Lógica de consumo dos silos da calcinação velha e nova**

A lógica de consumo dos silos da calcinação velha e nova, apresentado na **Figura 45**, é similar à lógica de consumo anterior, para cada entidade que passa por esta, ocorre o acumulo do valor do lote de abastecimento ao silo de menor volume atual, porém nestes casos, caso os silos não possam receber material, devido ao seu volume, a entidade passa por um módulo “assign” que registra o tempo que se deu início a espera, para registrar assim o tempo total de parada dos silos.

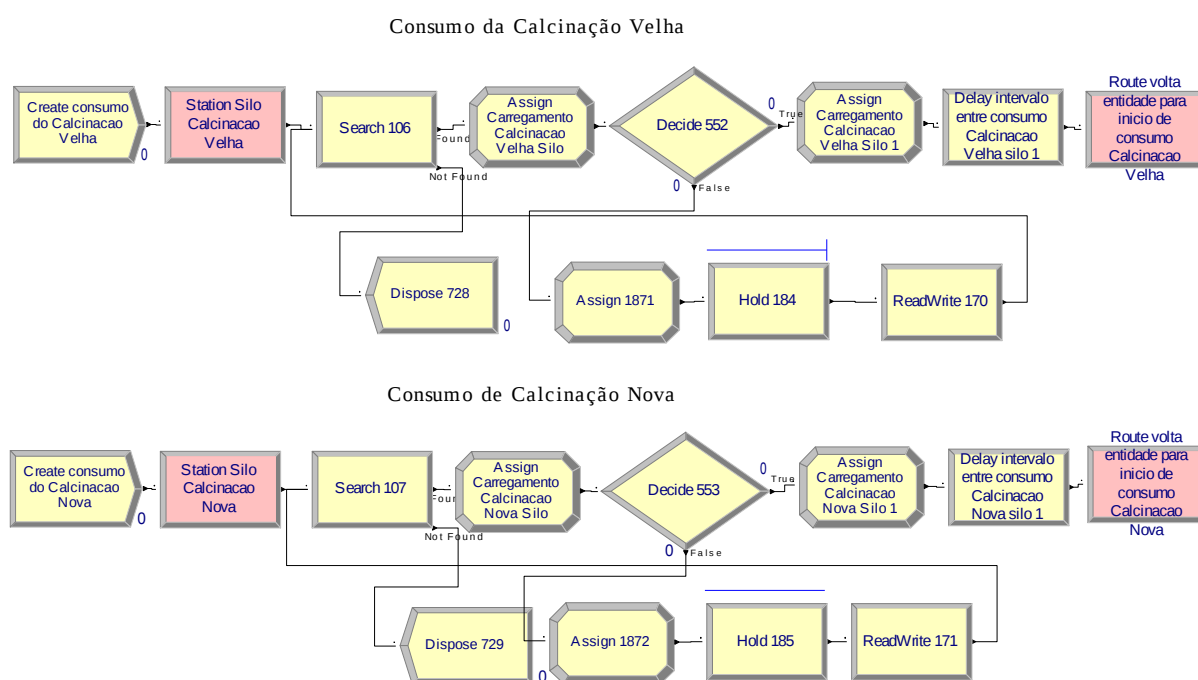


Figura 45 – Lógica de consumo dos silos da calcinação velha e nova.

4.2.1.4 Falhas

Este sub-modelo contempla a lógica de falhas das correias transportadoras que controla a ocorrência de paradas dos diversos equipamentos do sistema. De acordo com a lógica de falhas, apresentada na **Figura 46**, a rota que estiver utilizando a correia transportadora que parar para manutenção preventiva ou acidental, passará a ter status igual a (-1), permanecendo assim durante o tempo programado para reparo. Passado este tempo, o *status*

da rota volta a ter condições de ser operada. A variável “v_status_rotas” é marcada no índice escolhido pelo módulo “hold”. Este módulo espera o tempo necessário para ocasionar a falha, liberando a entidade para passar por um módulo “assign” que marca a variável com o valor (-1). Quando a entidade for utilizar uma correia transportadora ela verifica a variável “v_status_rotas”, se ela estiver com valor (-1) a entidade não acessa a correia transportadora tornando a mesma indisponível para o sistema.

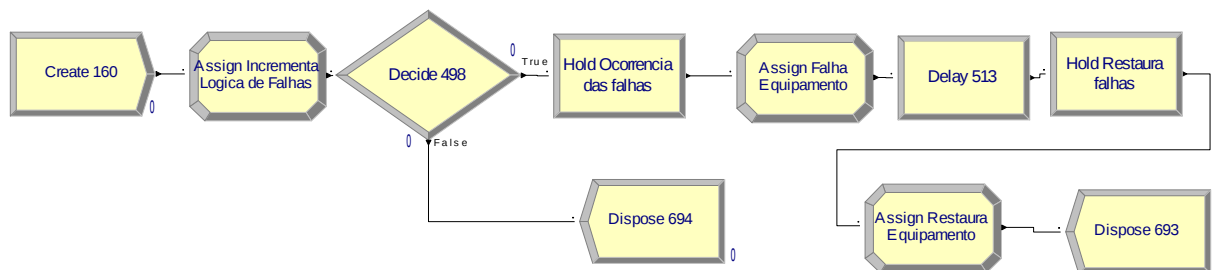


Figura 46 – Lógica de falhas.

4.2.1.5 Variáveis

Apresenta-se na **Tabela 5** os principais parâmetros e variáveis do modelo. Os parâmetros operacionais do sistema foram modelados por um conjunto de variáveis, de maneira que, durante a validação e experimentação do modelo, fosse possível a alteração de tais parâmetros, conforme a configuração do sistema e do cenário a ser simulado.

Tabela 5 – Principais variáveis do sistema de manuseio de matérias-primas.

Variável	Descrição
"v_IN_ChegCamHopper"	Variáveis de programação de chegada de caminhões no hopper rodoviário
"v_IN_ChegCompHopper"	Variáveis de programação de chegada de composições do hopper ferroviário
"v_IN_ChegVirador"	Variáveis de programação de chegada de composições no virador de vagões
"v_IN_ProgEnvioHF"	Variáveis de programação de envio de matérias-primas do hopper ferroviário
"v_IN_ProgEnvioHR"	Variáveis de programação de envio de matérias-primas do hopper rodoviário
"v_IN_QtdCompHopper"	Variáveis de programação de chegada da quantidade de composições no hopper ferroviário
"v_IN_QtdCompVirador"	Variáveis de programação de chegada da quantidade de composições no virador de vagões
"v_IN_VagHopper"	Variáveis de programação que indica a quantidade de vagões existentes no hopper ferroviário
"v_IN_VagVirador"	Variáveis de programação que indica a quantidade de vagões existentes no virador de vagões
"v_lista_rotas"	Cadastro geral de rotas com as correias transportadoras correspondentes
"v_patio_PM1"	Variável de controle do pátio de matérias-primas 1
"v_silo_alto_forno_1"	Variável de controle de parâmetros dos silos do alto-forno 1
"v_silo_alto_forno_2"	Variável de controle de parâmetros dos silos do alto-forno 2
"v_silo_alto_forno_3"	Variável de controle de parâmetros dos silos do alto-forno 3
"v_silo_calcario"	Variável de controle de parâmetros dos silos de calcário
"v_silo_calcinacao_nova"	Variável de controle de parâmetros dos silos da calcinação nova
"v_silo_calcinacao_velha"	Variável de controle de parâmetros dos silos da calcinação velha
"v_silo_de_blendagem"	Variável de controle de parâmetros dos silos da blendagem
"v_silo_de_mistura"	Variável de controle de parâmetros dos silos de mistura da sinterização
"v_silo_hopper_ferrovuario"	Variável de controle de parâmetros dos silos do hopper ferroviário
"v_silo_hopper_rodoviario"	Variável de controle de parâmetros dos silos do hopper rodoviário
"v_silos_coque"	Variável de controle de parâmetros dos silos de coque
"v_silos_pelotas"	Variável de controle de parâmetros dos silos de pelotas
"v_status_rotas"	Cada linha da variável corresponde a uma correia transportadora. Esta variável incrementa o valor quando a matéria-prima acessa a correia transportadora *.

* Este raciocínio também é válido para os equipamentos do sistema, e pode assumir os seguintes valores: (0) – correia disponível; (>0) – correia ocupada; (-1) – correia em falha.

4.2.2 Interface do modelo

O modelo operacional do pátio de matérias-primas necessita ser alimentado por uma imensa massa de informações. Para tanto, foi elaborada uma interface em planilha eletrônica, que serve para armazenar as informações do cenário, e também como meio de apresentação dos resultados.

As **Tabelas 6, 7, 8, 9 e 10** a seguir apresentam as chegadas de composições de vagões com minério de ferro no virador de vagões, chegadas de composições de vagões com fundentes no *hopper* ferroviário, chegadas de caminhões com fundentes no *hopper* rodoviário, chegadas de pelotas via correia transportadora e chegadas de rejeitos via

caminhão. Por meio delas, o usuário pode agendar a data e hora da chegada de composições de vagões ou comboio de caminhões e identificar:

- A matéria-prima contida nos vagões;
- A quantidade de vagões em cada composição
- A matéria-prima contida nos caminhões;
- A quantidade de caminhões no comboio;
- O destino das matérias-primas recebidas;
- A quantidade de matérias-primas recebidas via cada modal de transporte.
- O estado em que a matéria-prima se encontra (seco ou úmido);
- A rota que será utilizada pela matéria-prima (escolha da rota a ser utilizada);
- O destino desta matéria-prima (escolha do destino final).

Tabela 6 – Tabela de programação de chegadas de composições de vagões no virador de vagões.

Programação do virador de vagões - Previsão de chegadas											
Composição	Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Vagões	Material	t/ vagão	Estado	Rota	Destino
1	4	5	2011	1	10	84	8	74	1	630	238
2	4	5	2011	10	45	84	9	74	1	639	235
3	4	5	2011	15	15	84	10	74	1	631	239
4	5	5	2011	1	15	84	11	74	2	634	53
5	5	5	2011	8	28	84	12	74	2	630	238
6	5	5	2011	8	19	84	13	74	2	629	52

Tabela 7 – Tabela de programação de chegadas de composições de vagões do *hopper* ferroviário.

Programação do <i>hopper</i> ferroviário - Previsão de chegadas											
Composição	Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Vagões	Material	t/ vagão	Estado	Rota	Destino
1	4	5	2011	1	9	30	3	62	2	9	197
2	4	5	2011	6	20	20	7	70	2	8	195
3	5	5	2011	2	20	36	7	70	2	9	195
4	5	5	2011	7	28	18	3	62	2	9	197

Tabela 8 – Tabela de programação de chegadas de caminhões do *hopper* rodoviário.

Programação do <i>hopper</i> rodoviário - Previsão de chegadas									
Comboio	Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Caminhões/ Comboio	Material	t /caminhão	Estado
1	4	5	2011	6	10	10	3	27	2
2	4	5	2011	7	20	15	7	27	2
3	4	5	2011	8	15	20	7	27	2
4	4	5	2011	9	45	15	3	27	2
5	4	5	2011	10	18	10	5	27	2
6	4	5	2011	11	40	30	5	27	2
7	5	5	2011	5	55	20	5	25	2
8	5	5	2011	6	25	30	5	25	2
9	5	5	2011	7	25	15	5	25	2
10	5	5	2011	8	55	15	5	25	2
11	5	5	2011	10	45	10	5	25	2
12	5	5	2011	12	10	10	5	25	2

Tabela 9 – Tabela de programação de chegadas de pelotas.

Programação de pelotas - Previsão de chegadas											
Pelotas	Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Lote	Material	t/ lote	Estado	Rota	Destino
1	4	5	2011	1	10	1	20	1.500	1	6	156
2	4	5	2011	5	45	1	20	2.000	1	6	156
3	4	5	2011	9	15	1	20	1.000	1	6	156
4	4	5	2011	12	15	1	20	2.500	2	6	156
5	4	5	2011	15	28	1	20	3.500	2	6	156
6	4	5	2011	17	19	1	20	1.800	2	6	156
7	4	5	2011	20	26	1	20	1.000	3	6	156
8	4	5	2011	23	28	1	20	2.500	3	6	156

Tabela 10 – Tabela de programação de chegadas de rejeitos.

Programação de chegada de rejeito - Previsão de chegadas									
Comboio	Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Caminhões/ Comboio	Material	t /caminhão	Estado
1	4	5	2011	6	15	10	27	27	1
2	4	5	2011	7	30	5	28	27	1
3	4	5	2011	8	25	15	25	20	1
4	4	5	2011	9	55	10	25	20	1
5	5	5	2011	10	14	10	27	25	2
6	5	5	2011	11	11	9	27	20	2
7	5	5	2011	5	15	8	30	25	2
8	5	5	2011	6	25	20	30	25	2

A **Tabela 11** a seguir apresenta a programação de envio de fundentes do *hopper* rodoviário para o pátio de matérias-primas.

Tabela 11 – Tabela de programação de envios de fundentes do *hopper* rodo-ferroviário.

Envios programados do <i>hopper</i> rodo-ferroviário									
Envio	Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Material	Rota	Toneladas	Destino
1	4	5	2011	6	10	16	15	900	SR3
2	4	5	2011	7	20	1	15	6.000	SR3
3	4	5	2011	8	15	1	10	1.000	SR3
4	4	5	2011	9	45	1	10	6.000	SR3
5	4	5	2011	10	18	1	10	5.000	Silos da Calcinação
Envios executados no <i>hopper</i> ferroviário (resposta do modelo)									
Envio	Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Atraso (min)			
1	4	5	2.011	10	10	240			
2	4	5	2.011	11	50	170			
3	4	5	2.011	12	15	240			
4	4	5	2.011	15	15	360			
5	4	5	2.011	20	20	602			

Tabela 12, ressaltando que a interface é interligada e consistente em todas as partes da mesma. Para isso, a lista de materiais (*Tabela 2 item 4.1*) é única em todo o sistema, assim como também os equipamentos funcionais e os que estão com manutenção programada. O consumo de cada equipamento, para cada material, bem como a capacidade real de cada silo de armazenagem também precisa ser informado.

Tabela 12 – Configuração dos silos do sistema.

SILOS DO HOPPER RODOVIÁRIO									
Silo	Volume (m ³)	Nível mínimo	Nível atual	Nível máximo	Material	Densidade	Tonelada/carga (t)	Operação	Consumo (t/h)
6 tremonhas	138	11	182	228	1	1,7	100	Não	800
SILOS DO HOPPER FERROVIÁRIO									
Silo	Volume (m ³)	Nível mínimo	Nível atual	Nível máximo	Material	Densidade	Tonelada/carga (t)	Operação	Consumo (t/h)
19 tremonhas	1.007	101	201	2.014	11	2,0	1	Sim	1.000
SILO DO VIRADOR DE VAGÕES									
Silo	Volume (m ³)	Nível mínimo	Nível atual	Nível máximo	Material	Densidade	Tonelada/carga (t)	Operação	Consumo (t/h)
1 tremonha	224	22	179	448	13	2,0	560	Sim	2.000
SILOS DA BLENDAGEM									
Silo	Volume (m ³)	Nível mínimo	Nível atual	Nível máximo	Material	Densidade	Tonelada/carga (t)	Operação	Consumo (t/h)
CFW201	700	238	595	952	27	1,7	45	Sim	45
CFW202	700	231	578	924	1	1,7	63	Sim	63
CFW203	700	231	578	924	1	1,7	63	Sim	63
CFW204	700	280	700	700	32	2,0	129	Sim	129
CFW205	700	280	700	1.120	14	2,0	201	Sim	201
CFW206	700	280	700	1.120	14	2,0	201	Sim	201
CFW207	700	280	700	1.120	14	2,0	199	Sim	199

Outra característica particular das simulações operacionais é que não são modeladas paradas aleatórias. A adoção de paradas com base em histórico não faz sentido neste tipo de simulação, visto que não se pode prever o futuro a curto prazo, apenas estimar seu provável comportamento a médio ou longo prazo. Portanto, apenas as paradas programadas (preventivas e emergenciais) são usadas, conforme **Tabela 13**.

Tabela 13 – Programação de paradas dos equipamentos.

Paradas das Correias Transportadoras	Índice	Falha em equipamento	Hora de início (h)	Hora de término (h)	Início no 1º ou 2º dia	Fim no 1º ou 2º dia
L200R	1	Não	0:20	12:10	0	1
L201	2	Não	13:30	14:27	0	1
L202	3	Não	13:30	14:27	0	1
L203	4	Não	13:30	14:27	0	1
L204A	5	Não	13:30	14:27	0	1
L204B	6	Não	13:30	14:27	0	1
L205A	7	Não	13:30	14:27	0	1
L205B	8	Não	13:30	14:27	0	1
L206	9	Sim	13:30	14:27	1	1
L207	10	Sim	13:30	14:27	1	1
L208	11	Sim	13:30	14:27	1	1
L209	12	Sim	13:30	14:27	1	1
L210	13	Sim	13:30	14:27	2	2
L211	14	Sim	13:30	14:27	1	1
L1	15	Não	13:30	14:27	0	1
L2	16	Não	13:30	14:27	0	1

Outros itens parametrizados na interface de operação são os **sistemas**, apresentado na **Tabela 14**, onde faz-se o cadastro das capacidades das correias transportadoras relacionando as diversas matérias-primas com o sistema a ser utilizado; os **parâmetros**, apresentados na **Tabela 15**, que possui informações sobre tempos de descarga de vagões de minério no virador e fundentes no *hopper* ferroviário, nos estados seco e úmido, tempo de descarga de caminhões e rendimento da sinterização; o **pátio**, que possui informações sobre o volume de matérias-primas armazenados em cada pátio, separado por baliza (baliza é a distância entre dois pontos consecutivos no pátio igual a 5m). Apresenta-se na **Tabela 16** um exemplo de formação e consumo de duas pilhas de matérias-primas, estas matérias-primas ocupam a área do pátio até a baliza 42 de um total de 120 balizas por pátio e as **peneiras**, apresentadas na **Tabela 17**, que possui a entrada de dados de percentual de degradados relativos as peneiras novas, velhas do sistema, ou seja, peneiras da fase 7,5 Mt/ ano e da fase 5,0 Mt/ ano respectivamente.

Tabela 14 – Sistema de cadastro das capacidades das correias transportadoras por tipo de matéria-prima.

Sistemas de Correias Transportadoras (t/h)											
Matérias - primas	L	B	M	D	F	S	R	K	CK	L Novo	H
Pelota de alto-forno		2000	1800	1400							1800
Rejeito	800		1800								
Calcário fino			1500								1500
Calcário bitolado - CAB		2500	2500	1400				800			2500
Calcário bitolado - DOL	1100		1800					800		1500	2500
Minério fino - SFFA	1150		2800							1800	2800
Dunito			2500								2500
Minério fino - SFAC	1350		2800							1800	
Minério fino - FMTU	1350									1800	
Minério Fino - FPTU	1100		1500							1200	
Quartzo	280						300			280	
Minério Granulado - ILMG			1500								1500
Minério Granulado - NPMB	1150		2800							1800	
Calcário fino			1500								1500
Combustível - CSOL	300				100		250		300	300	
Combustível - RAF1	300				100		90		300	300	
Combustível - RAF2	300				100		90		300	300	
Combustível - RAF3	300				100		300		300	300	
Sinter	1150					800				1200	
Blendado		2000		1250							
Rejeito - RCFG					415		415				
Rejeito - RDEG		700	700								

Tabela 15 – Exemplo de alguns parâmetros do sistema.

Índice	Descrição dos parâmetros do sistema	Valor	Unidade
1	Tempo para descarregar matérias-primas nos silos	0,6	minuto
2	Tempo de descarga do caminhão no hopper rodoviário	0,3	minuto
3	Tempo de descarregar minério de ferro fino no virador de vagões seco	2,0	minuto
4	Tempo de descarregar minério de ferro granulado no virador de vagões	1,5	minuto
5	Tempo de descarregar vagão no virador matéria-prima em geral	2,0	minuto
6	Tempo de transporte dos SR's para a correia transportadora	0,2	minuto
8	Tempo de descarga do hopper rodoviário	15,0	minuto
9	Tempo de descarga de calcário fino no hopper ferroviário (úmido)	27,0	minuto
10	Tempo de descarga de calcário bitolado no hopper ferroviário	20,0	minuto
11	Tempo de descarga de caminhão de fundentes	7,5	minuto
12	Rendimento de sinter	77,0	%
13	Tempo de descarregar calcário fino no hopper ferroviário (seco)	20,0	minuto
14	Tempo de descarga de minério de ferro fino no virador de vagões (úmido)	2,5	minuto

Tabela 16 – Configuração do pátio de matérias-primas.

Informações do Pátio	Total de matéria-prima armazenada (t)	Ângulo da matéria-prima	Capacidade de armazenamento por baliza		Matéria-prima armazenada	- Formação (1) - Consumo (2)	Próximo estado da pilha (formação ou consumo)
			SR	Caminhão			
1	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
2	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
3	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
4	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
5	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
6	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
7	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
8	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
9	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
10	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
11	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
12	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
13	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
14	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
15	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
16	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
17	128	9	128	128	Quarzo - QZB - QZBG	Consumo	Formação
18	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
19	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
20	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
21	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
22	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
23	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
24	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
25	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
26	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
27	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
28	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
29	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
30	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
31	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
32	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
33	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
34	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
35	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
36	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
37	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
38	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
39	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
40	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
41	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação
42	1.899	38	1.899	1.899	Minério Fino - MINÉR-PH-SFAL	Consumo	Formação

Tabela 17 – Peneiras do sistema.

Matéria-prima	Código da matéria-prima	Percentual peneirado	Percentual de degradado
Sinter	38	82	18
Minério Granulado - MMG - NPMB	18	90	10
Minério Granulado - ILMEN - ILMG	17	98	2
Combustível - RAF3 - RAF3	37	97	3
Combustível - RAF2 - RAF2	36	97	3
Pelota - PELOT - PEAFF	20	98	2
Quartzo - QZB- QZBG	21	90	10
Combustível - CSOL - coque sol	34	70	30
Combustível - RAF1 - RAF1	35	97	3

4.2.3 Animação do modelo do pátio de matérias-primas

Um elemento que assume grande importância na simulação operacional é a animação. Nos estudos estratégicos, a animação é usada principalmente para validar o modelo na etapa de desenvolvimento, e para sua divulgação depois de concluído o estudo. No caso do estudo operacional, uma animação detalhada é de suma importância, pois permite aos supervisores/ operadores acompanharem tudo que está acontecendo com o sistema, como se fosse o próprio sistema supervisório (sistema de controle do recebimento e manuseio de matérias-primas interligado ao sistema real, através do qual os supervisores controlam as entradas e saídas de matérias-primas). Essa opção é viável, já que a simulação não é executada por longos períodos como no caso dos estudos estratégicos. No caso deste estudo, adotou-se exatamente a imagem do sistema supervisório para desenvolvimento da animação do modelo operacional do manuseio de matérias-primas, visto que permite um entendimento imediato por parte dos operadores do sistema real. Essa imagem é apresentada na **Figura 47**.

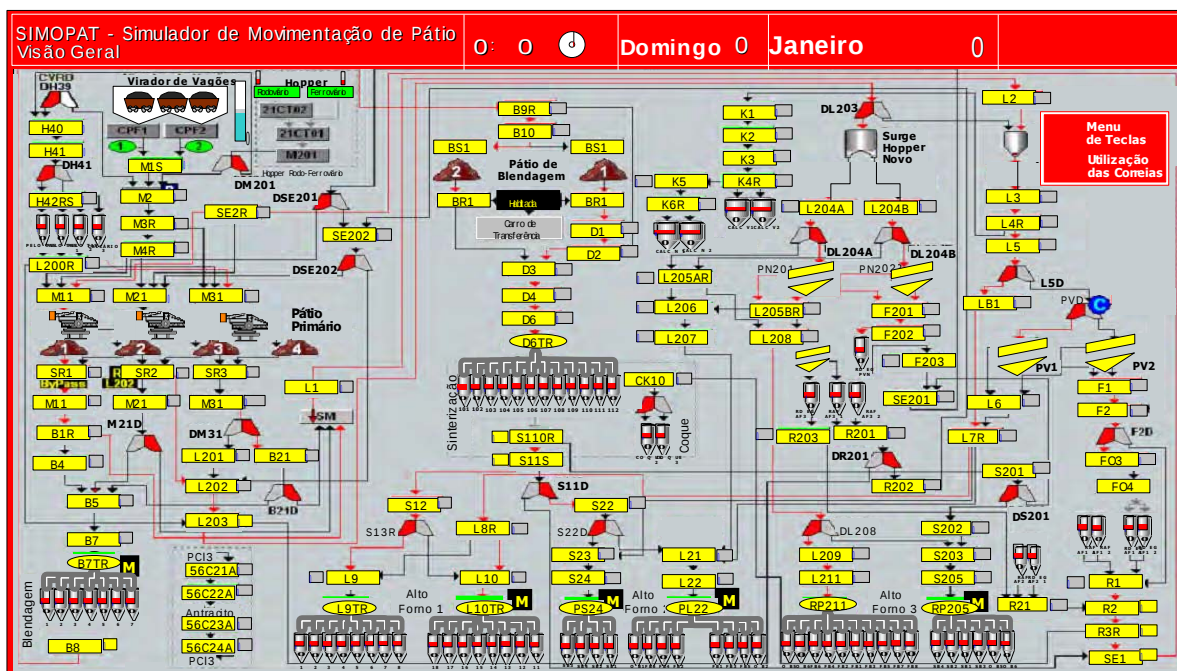


Figura 47 – Animação do modelo replicando o visual do sistema supervisório.

A Figura 47 apresenta uma visão geral de todo o sistema de manuseio de matérias-primas, e nas Figuras 48 a 56 observa-se parte do sistema de manuseio de matérias-primas em destaque, ou seja, a alternativa utilizada no sistema supervisório real é contemplada no modelo. Uma vez que o usuário final deste modelo é o supervisor/operador do pátio de matérias-primas, a animação é de fundamental importância, uma vez que ele precisa visualizar os resultados de suas decisões por todo o sistema. Esta característica permite que ele identifique qual o sistema está sobrecarregado, qual atua como gargalo e qual poderia ser melhor utilizado.

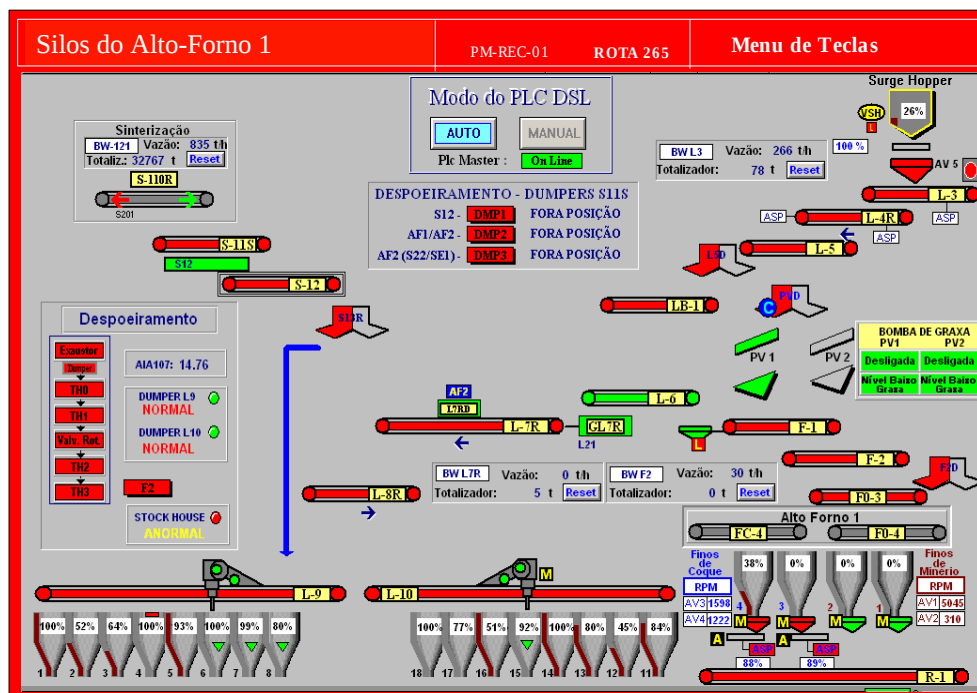


Figura 48 – Visão geral dos silos do Alto-Forno 1.

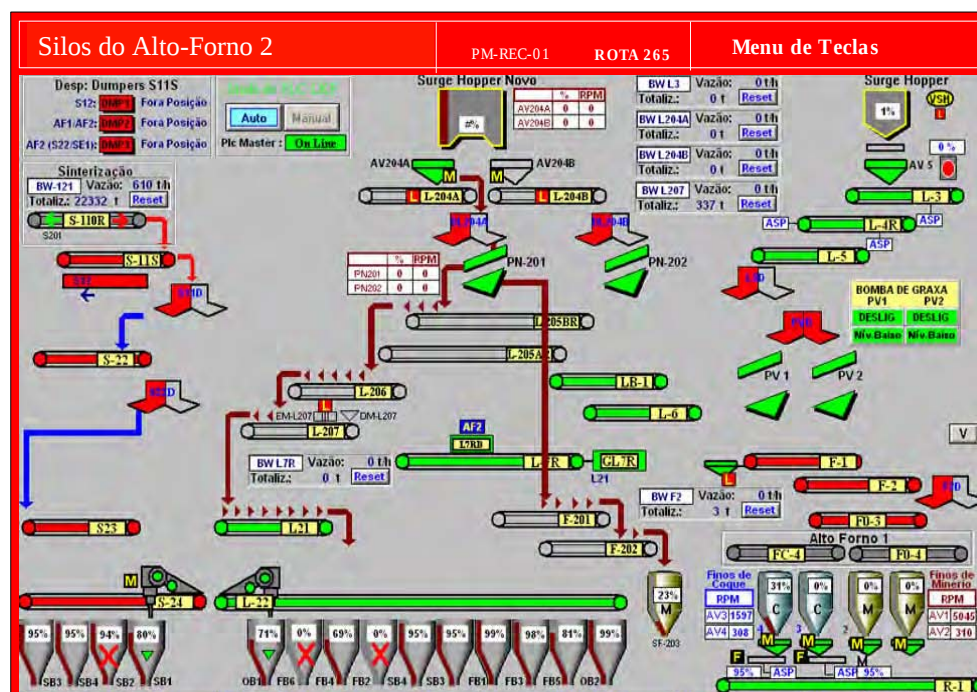


Figura 49 – Visão geral dos silos do Alto-Forno 2.

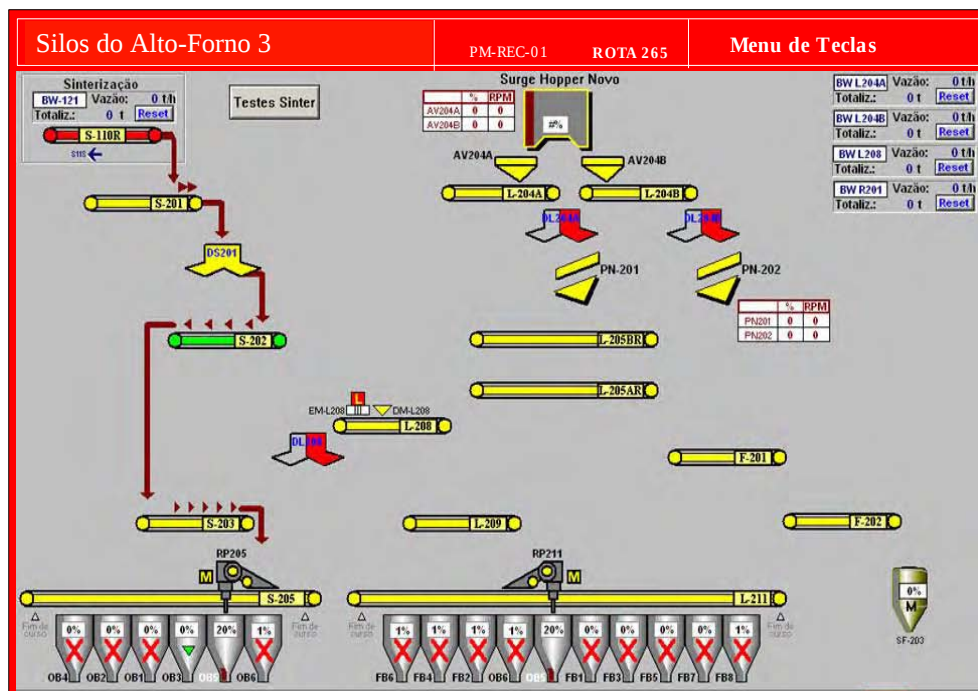
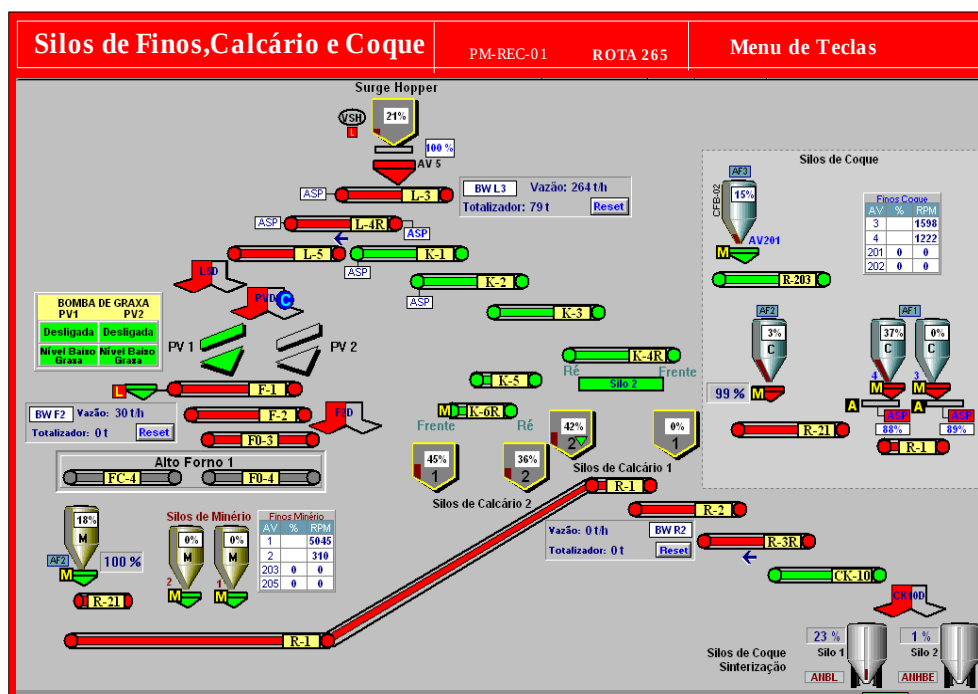


Figura 50 – Visão geral dos silos do Alto-Forno 3.



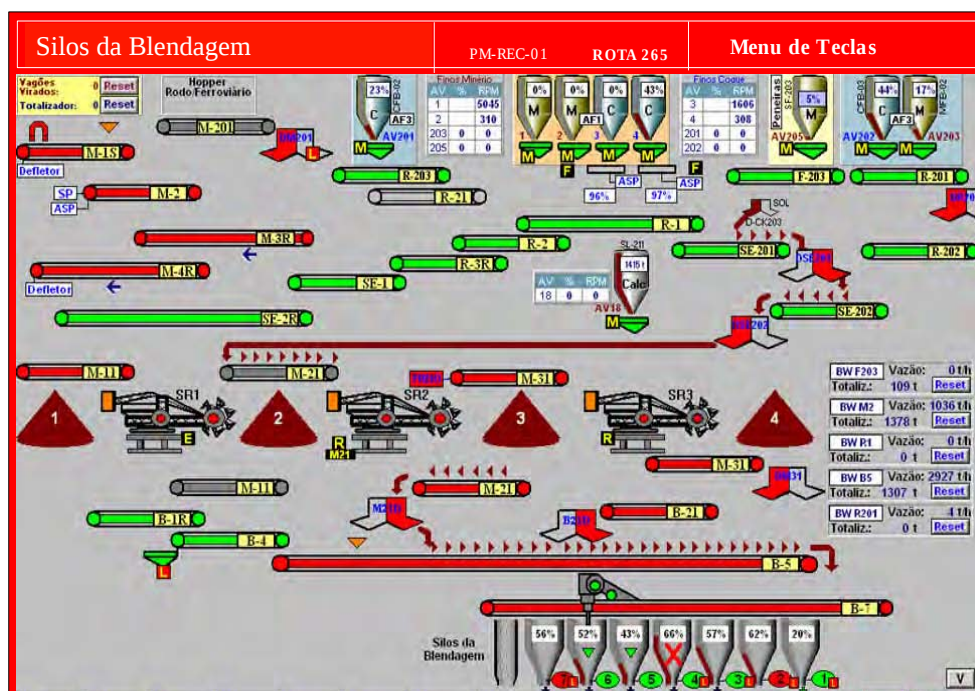


Figura 52 – Visão geral dos silos da blendagem.

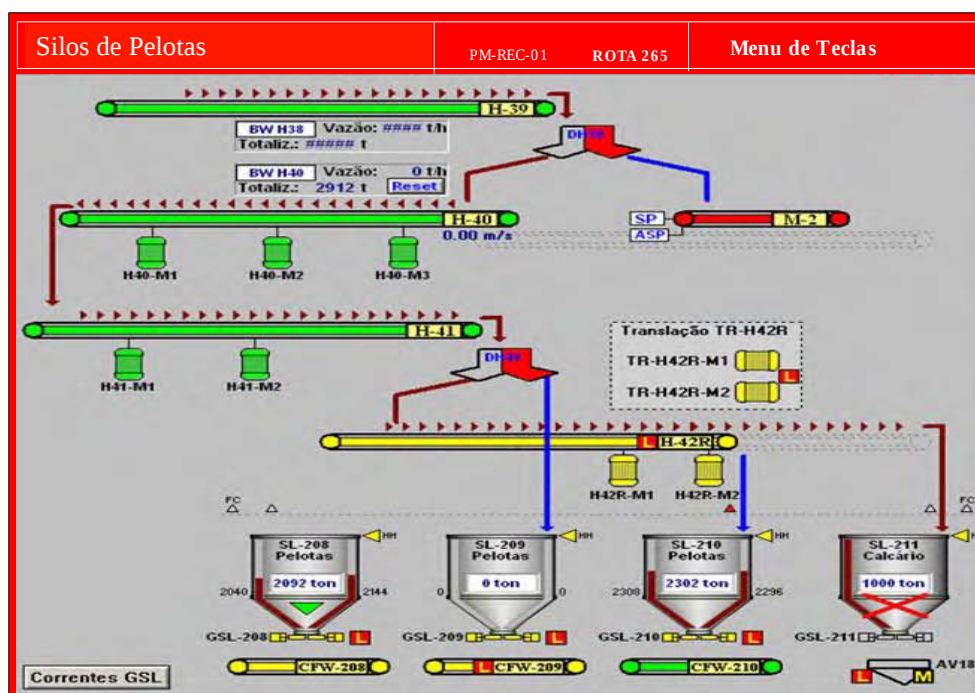


Figura 53 – Visão geral dos silos de pelotas.

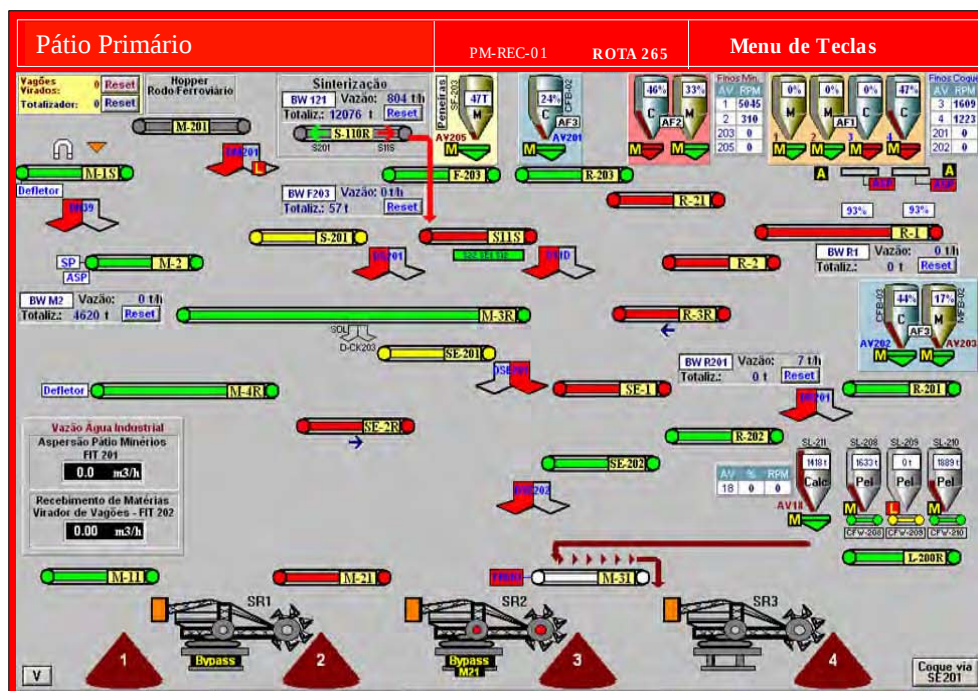


Figura 54 – Visão geral dos pátios primários.

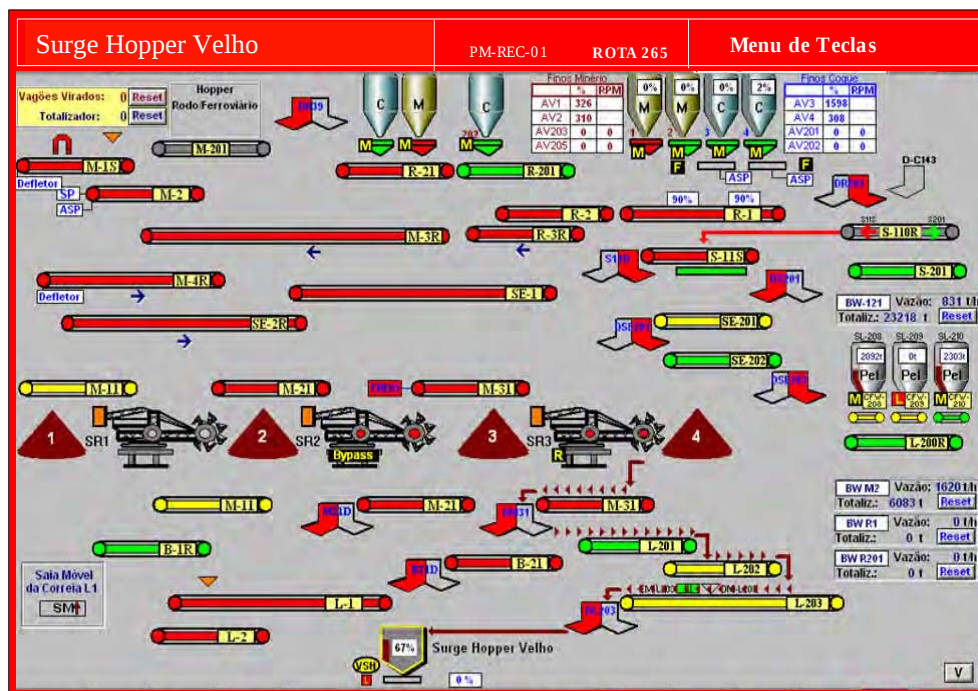


Figura 55 – Visão geral do surge hopper velho.

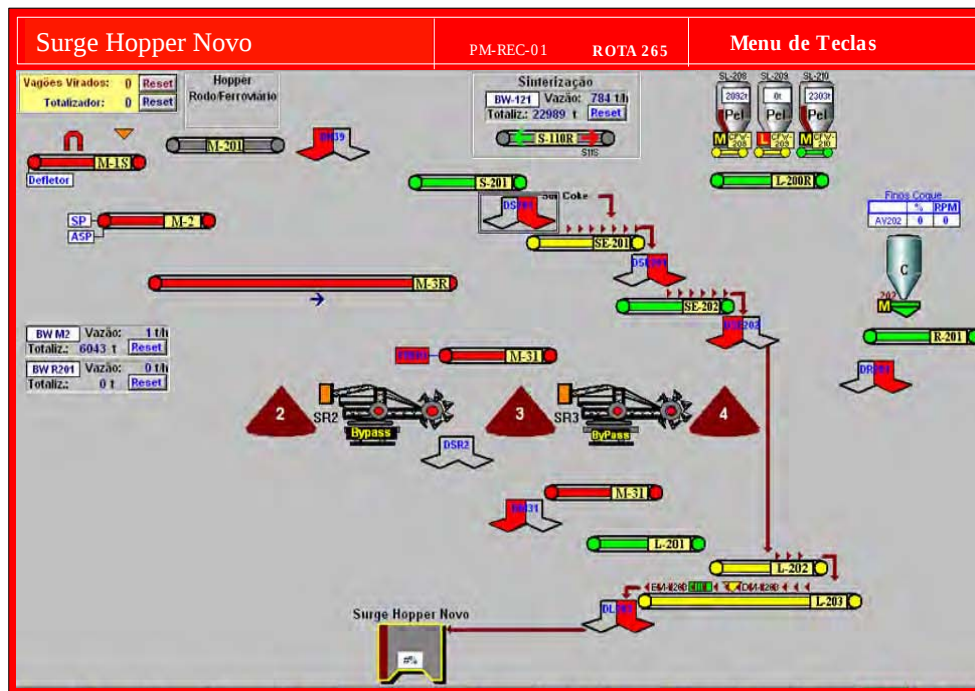


Figura 56 – Visão geral do surge *hopper* novo.

4.3 Modelagem estática do pátio de matérias-primas

Apresenta-se a seguir a modelagem estática do pátio de matérias-primas, que foi elaborada para permitir a validação do modelo dinâmico e a elaboração do mapa do pátio, a partir de resultados de cenários consistentes.

Os parâmetros utilizados na modelagem estática do pátio de matérias-primas são listados a seguir:

- A entrada e saída de matérias-primas do sistema;
- A lista de matérias-primas do pátio;
- As características das matérias-primas, tais como: densidade e ângulo de repouso;
- A quantidade de matéria-prima por baliza (baliza é a distância entre dois pontos consecutivos no pátio igual a 5m) é variável em função da:
 - Matéria-prima a ser estocada;
 - Características da matéria-prima;
 - Restrições operacionais;

- Dimensões da pilha/ pátio (comprimento, largura);
- Volume de matéria-prima a ser estocada;
- Altura da pilha de matéria-prima que é função do ângulo de repouso do material;
- Informações sobre a pilha de matérias-primas nova ou existente:
 - Se a pilha é nova, indica-se:
 - O volume a ser estocado;
 - O pátio que será estocado a matéria-prima;
 - O endereço inicial, de 0 a 600 (comprimento total do pátio);
 - Se a pilha é existente, indica-se:
 - O volume a ser estocado;
 - O volume existente na pilha;
 - O pátio que será estocado a matéria-prima;
 - A pilha que será estocada;
 - O endereço da pilha no pátio, baliza que vai de 0 a 600 metros (comprimento do pátio).

No modelo estático a altura da pilha de matérias-primas é limitada pela altura máxima da lança do *staker reclaimer* (SR) que é de 15 metros. Caso o ângulo de repouso da matéria-prima permita que a pilha tenha altura superior à altura máxima da lança do SR, iguala-se a altura da pilha à altura máxima da lança do SR. Por exemplo, o ângulo de repouso do minério de ferro que é de 38° resultaria em uma pilha de 17,8 metros de altura, considerando as dimensões do pátio de matérias-primas da AMT, com base 45 metros, porém em função de restrições da altura de lança do SR adota-se a altura de pilha de 15 metros.

O cálculo da quantidade de matéria-prima por pilha é apresentado na **Figura 57**.

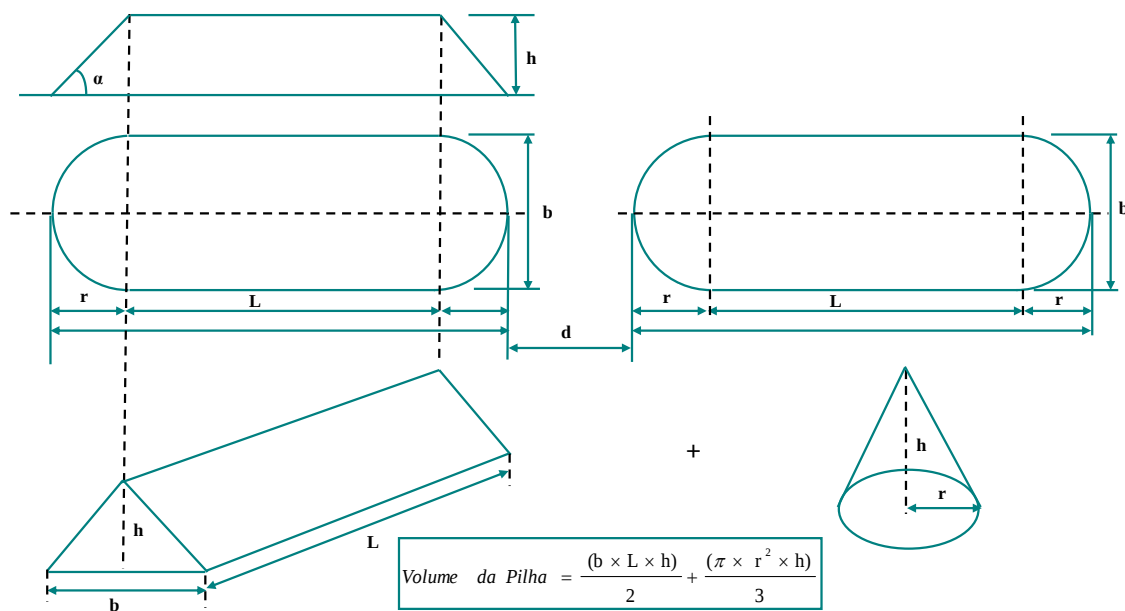


Figura 57 – Fórmula de cálculo da quantidade de matéria-prima por pilha.

Uma parte da memória de cálculo do modelo estático utilizada para validação do modelo dinâmico é apresentada na **Tabela 18**, onde se observa:

- A taxa de ocupação dos equipamentos do sistema;
- A taxa de ocupação dos sistemas de correias transportadoras em percentual;
- Os volumes de matérias-primas transportados por cada sistema.

Tabela 18 – Modelo estático utilizado para validação do modelo dinâmico.

Simulação - Virador de Vagões	Produtividade (t/ h)	Matéria-Prima (t/ dia)	Tempo de Funcionamento (h/ dia)	Taxa de Ocupação (%)	Matéria-Prima (t/ mês)
Minério de ferro granulado	2.521	3.436	1,4	6%	103.066
Minério de ferro fino	1.671	14.083	8,4	35%	422.496
Total	1.838	17.519	9,8	41%	525.562
Simulação - Hopper Ferroviário	Produtividade (t/ h)	Matéria-Prima (t/ dia)	Tempo de Funcionamento (h/ dia)	Taxa de Ocupação (%)	Matéria-Prima (t/ mês)
Calcário granulado	879	4.067	4,6	19%	122.000
Calcário fino	768	1.167	1,5	6%	35.000
Total	851	5.303	6,3	26%	159.090
Simulação - Sistemas L	Produtividade (t/ h)	Matéria-Prima (t/ dia)	Tempo de Funcionamento (h/ dia)	Taxa de Ocupação (%)	Matéria-Prima (t/ mês)
Minério granulado	1.200	3.436	2,9	12%	103.066
Calcário granulado	712	4.067	5,7	24%	122.000
Small coque	213	411	1,9	8%	12.334
Quartzo	300	70	0,2	1%	2.090
Pelotas	1.380	14.637	10,6	44%	439.117
Total	1.208	22.620	21,3	89%	678.607
Simulação - Sistema B	Produtividade (t/ h)	Matéria-Prima (t/ dia)	Tempo de Funcionamento (h/ dia)	Taxa de Ocupação (%)	Matéria-Prima (t/ mês)
Minério de ferro fino	1.555	14.083	9,1	38%	422.496
Calcário fino	1.086	2.435	2,2	9%	73.055
Finos sinter e minérios	1.047	2.792	2,7	11%	83.759
Rejeitos	689	1.062	1,5	6%	31.854
Calcário fino para Sinterização	643	427	0,7	3%	12.812
Total	1.369	20.799	16,2	67%	623.976
Simulação - Sistema R	Produtividade (t/ h)	Matéria-Prima (t/ dia)	Tempo de Funcionamento (h/ dia)	Taxa de Ocupação (%)	Matéria-Prima (t/ mês)
Finos sinter e minérios	415	2.792	6,7	28%	83.759
Fino coque	213	899	4,2	18%	26.970
Small coque	64	411	6,4	27%	12.334
Total	336	4.102	17,4	72%	123.063
Simulação - Sistema SE	Produtividade (t/ h)	Matéria-Prima (t/ dia)	Tempo de Funcionamento (h/ dia)	Taxa de Ocupação (%)	Matéria-Prima (t/ mês)
Finos sinter e minérios	415	2.792	6,7	28%	83.759
Fino coque	213	899	4,2	18%	26.970
Small coque	64	411	6,4	27%	12.334
Sinter do pátio	900	708	0,8	3%	21.234
Total	419	4.810	18,2	76%	144.297
Simulação - Sistema D	Produtividade (t/ h)	Matéria-Prima (t/ dia)	Tempo de Funcionamento (h/ dia)	Taxa de Ocupação (%)	Matéria-Prima (t/ mês)
Pilha Homogeneizada (PH)	812	20.372	25,1	105%	611.164
Calcário	643	385	0,6	2%	12.812
Small coque	213	411	1,9	8%	12.334
Total	797	21.168	27,6	115%	636.310

Após a construção e validação do modelo estático do pátio, buscou-se a integração com o modelo dinâmico, de tal forma a permitir o preenchimento automático do mapa do pátio após cada rodada de simulação. A **Figura 58** apresenta o mapa do pátio preenchido automaticamente a partir dos resultados de um cenário simulado no modelo dinâmico.

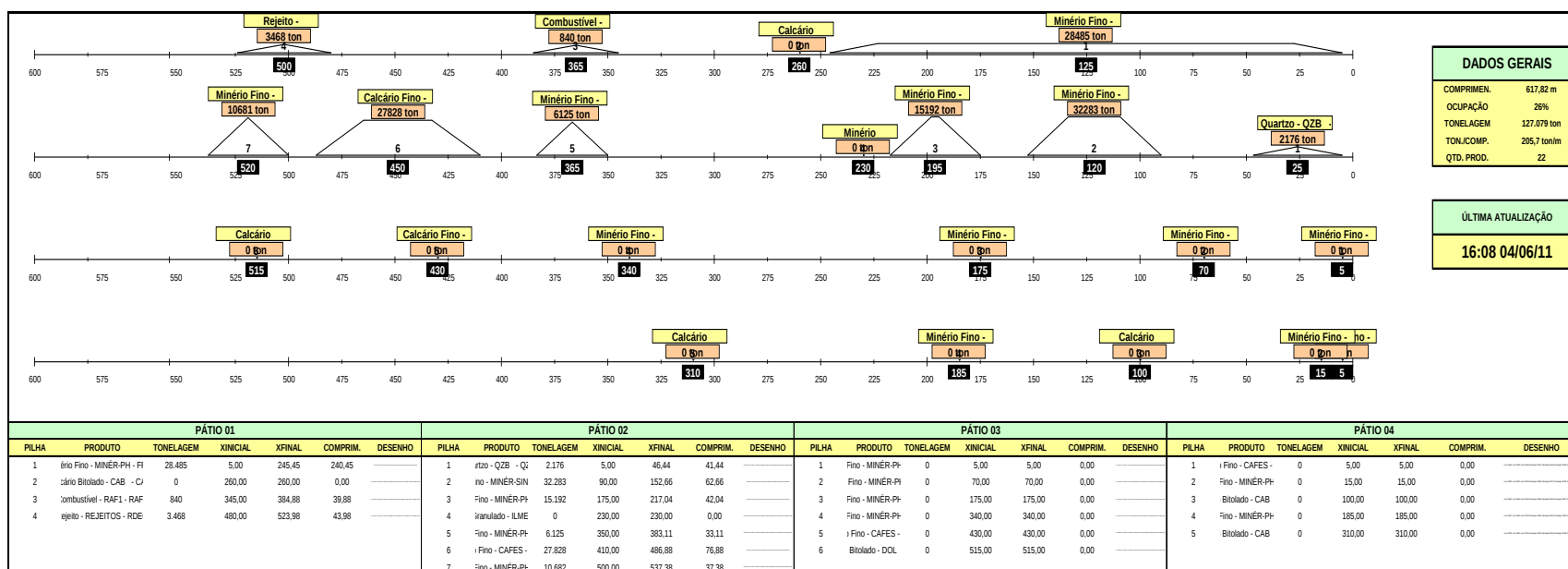


Figura 58 – Mapa do pátio de matérias-primas.

Anteriormente, o mapa do pátio era construído com base na experiência de cada operador, ou seja, o mesmo fazia a construção do mapa do pátio diariamente de forma manual, percorrendo-se toda a extensão dos pátios e estimando a quantidade de matéria-prima existente em cada pilha, bem como indicando a baliza inicial e final de cada pilha.

4.4 Simular, verificar e validar o modelo de simulação operacional

Durante a modelagem foi constatado, através de experimentos, que regras simples de funcionamento de alguns sistemas, tais como: os silos do sistema, o sistema de correias transportadoras, a operação de *by pass* de minério fino do virador de vagões para os silos da blendagem, não seriam suficientes para que o sistema funcionasse sem haver desabastecimento nos silos dos setores consumidores e processadores de matérias-primas. Tais situações não poderiam ser tratadas apenas de forma automática, como concebido originalmente, estes problemas foram modelados separadamente e criou-se regras específicas para cada um desses processos. Por exemplo, segue a descrição do ciclo da blendagem, contemplando as atividades do *by pass*, modelada separadamente de forma a evitar o desabastecimento dos silos da blendagem e sinterização:

a) Sequência de atividades do *by pass*:

- i. O silo de minério de ferro fino na blendagem deve estar vazio no instante zero e permanecer assim até o recebimento de uma composição no virador de vagões;
- ii. Durante o período em que o silo de minério de ferro fino estiver vazio ou a operação da blendagem paralisada, deve ser forçado o envio de calcário, degradado e rejeito dos pátios primários para os silos da blendagem de forma a atingir cem por cento (100%) da capacidade do silo;
- iii. A operação da blendagem só é iniciada a partir do momento em que os silos de calcário, degradado e rejeito apresentarem cem por cento (100%) da capacidade dos silos, a pilha de blendado não estiver completamente formada e os silos de minério de ferro fino possuir nível de estoque igual a cinquenta (50) por cento da capacidade do silo;
- iv. As composições de minério de ferro fino serão destinadas aos silos da blendagem (*by pass*) quando a pilha de blendado não estiver formada e os silos de calcário, degradado e rejeito apresentarem capacidade de cem por cento (100%);
- v. Ao final do envio de uma composição completa será enviado um lote com quantidade de “n” toneladas de minério de ferro fino do pátio para o silo, e a

blendagem continua trabalhando até que o silo de minério de ferro fino fique vazio;

- vi. Neste momento, o sistema B (sistema de correias que liga os pátios primários aos silos da blendagem) fica vazio, então, os silos de calcário, degradado e rejeito da blendagem são abastecidos até o nível máximo;
 - vii. A seguir, são abastecidos os silos de calcário e minério de ferro fino da sinterização (caso estejam com seu volume abaixo do nível de disparo) com volume suficiente para completar o silo naquele momento, parando o envio de blendado pelo sistema D (sistema de correias que liga os pátios da blendagem aos silos da sinterização) caso seja necessário.
- b) A composição de minério de ferro fino não será descarregada até que os silos de calcário, degradado e rejeito da blendagem apresentarem volume acima do nível de pedido;
 - c) As composições de minério de ferro fino que chegarem do virador de vagões serão destinadas aos pátios primários caso a pilha de blendado já esteja formada.
 - d) Em caso de parada da sinterização durante a descarga de minério de ferro fino, a blendagem continua operando normalmente até que todo o material dos vagões seja descarregado (incluindo também o lote do item “v” acima). Já as próximas composições devem ser reprogramadas de forma que a próxima entrega só volte a ocorrer após o reinício da operação da sinterização.
 - e) Caso o *blend stacker* tenha parada programada, a blendagem pára e a chegada de composições de minério de ferro fino é interrompida até que o *blend stacker* seja reativado. Neste caso, também são interrompidos o envio de minério de ferro fino e calcário para a sinterização.

O cenário estudado inicialmente foi o do sistema conforme seu projeto original. Nesta simulação, foram confirmadas as suspeitas quanto a insuficiência de alguns sistemas de correias transportadoras, bem como a necessidade de se priorizar algumas atividades. Estas restrições tiveram como consequência a falta de algumas matérias-primas nos setores consumidores e processadores de matérias-primas. Em seguida, foram realizados testes com o sistema considerando o aumento de capacidade de alguns sistemas de correias transportadoras e priorização das atividades consideradas relevantes. Foi constatado um

atendimento bem mais eficiente aos silos dos setores consumidores e processadores de matérias-primas.

Com isso, a modelagem original do MSO foi sendo gradativamente aprimorada, recebendo exceções de comportamento, prioridades de atendimento em determinados pedidos, em outras situações forçar a operação do sistema de forma específica. Desta forma, seu comportamento ficou mais semelhante à operação sob supervisão humana, melhorando sobremaneira seu desempenho, até não mais haver ocorrência de falta de matéria-prima nos setores consumidores e processadores.

Para verificação e validação do MSO simulou-se diversos cenários utilizando-se dados reais, sistema em regime, e inicialmente, com todos os equipamentos operando normalmente. Nesta etapa realizou-se vários testes, com pequenas alterações no cenário, de forma a comparar os resultados gerados pelo MSO, com uma simulação estática do sistema e com os resultados do sistema real, o que permitiu a validação do modelo dinâmico com maior precisão. A **Tabela 19** mostra o paralelo entre os resultados das produtividades dos sistemas de correias transportadoras da simulação dinâmica, da simulação estática e do sistema real para um cenário específico, onde pode-se observar a aderência do modelo dinâmico e do modelo estático ao sistema real.

Tabela 19 – Paralelo entre as produtividades das correias transportadoras (CT's) do modelo dinâmico, do modelo estático e do sistema real.

Paralelo entre as produtividades das correias transportadoras (CT's) do modelo dinâmico e do modelo estático/ sistema real		
Sistemas de CT's	Produtividade (t/ h) Modelo Dinâmico	Produtividade (t/ h) Modelo Estático/ Sistema Real
Sistema L	1.219	1.208
Sistema B	1.357	1.369
Sistema M	1.798	1.750
Sistema D	820	797
Sistema F	457	420
Sistema S	875	900
Sistema R	373	336
Sistema K	630	680
Sistema L Novo	1.896	1.910

Outra ferramenta utilizada para verificação e validação foi a animação do modelo. A animação detalhada é de suma importância, pois permite acompanhar tudo que está acontecendo com o sistema, como se fosse o próprio sistema supervisor. Nesta etapa, simularam-se cenários operacionais conhecidos e acompanhou-se a animação do modelo para conferir se a operação corresponde à realidade, e em seguida compararam-se os resultados registrados para atestar sua aderência à realidade. Após, passou-se a testar cenários com paradas de equipamentos, silos e sistemas de correias transportadoras, de forma a observar o comportamento dos mesmos e a aderência dos resultados com o sistema real. Este procedimento foi realizado para todos os equipamentos do sistema.

A etapa de verificação e validação consistiu na análise crítica dos dados gerados, em análises de sensibilidade do modelo e no acompanhamento da animação do modelo, onde evidenciou-se que os resultados do modelo têm aderência com o sistema real, ou seja, o modelo se desempenhou como esperado e pretendido.

CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No modelo operacional o objetivo não são as análises estatísticas, mas o resultado final atingido pela decisão empregada para carregar as matérias-primas. Como todo o processo é determinístico, o analista avalia as decisões de melhor utilização do sistema baseado no cenário atual e verifica o resultado pelos registros do sistema.

Devido à complexidade de um modelo estocástico e sua carga teórica necessária para criar um modelo em forma de “caixa-preta”, este modelo demonstrou ser extremamente robusto para o negócio da empresa, uma vez que o supervisor/ operador só precisa ser treinado na entrada de dados e interpretação de resultados. Além disso, a simulação é mais rápida que a operação real, o que permite testar diversos cenários antes que a programação do próximo turno seja efetivamente definida.

Diferente dos estudos estratégicos, onde os resultados são calculados e compostos basicamente de médias ou outras operações, o estudo operacional necessita responder apenas à pergunta: “o que aconteceu com o processo?”.

Neste caso, o resultado mais importante são os registros de estado do sistema, que contêm todos os acontecimentos e decisões tomadas pelo modelo, como quantidade de material manuseado, nível de cada silo do sistema em estudo, estado de cada equipamento responsável pelo recebimento e manuseio de matérias-primas do sistema, hora a hora, etc.

Este procedimento foi feito com este projeto, e o modelo revelou comportamento consistente. A **Tabela 20** apresenta parte do registro de resultados de todos os equipamentos do sistema (registro de movimentações realizadas), onde se pode observar o registro de envio da carga para cada vagão descarregado no virador de vagões, o registro de envio de matérias-primas do *hopper* rodo-ferroviário para os setores consumidores, e o recebimento de pelotas da VALE, entre outros. Por outro lado, na **Tabela 21** pode-se observar: a falta de matérias-primas nos setores consumidores; a paralisação dos silos de matérias-primas e também a paralisação das correias transportadoras e o histórico de uso das correias transportadoras.

Tabela 20 – Registro de movimentações, histórico de uso.

HISTÓRICO DE USO							
Dia	Mês	Ano	Hora	Minuto	Peso	Origem	Destino
4	5	2011	1	31	74	169	238
4	5	2011	1	33	74	169	238
4	5	2011	1	35	74	169	238
4	5	2011	1	37	74	169	238
4	5	2011	1	39	74	169	238
4	5	2011	1	41	74	169	238
4	5	2011	18	10	6.000	170	54
4	5	2011	18	11	74	169	239
4	5	2011	18	14	74	169	239
4	5	2011	18	16	74	169	239
4	5	2011	18	18	74	169	239
4	5	2011	18	20	74	169	239
4	5	2011	18	23	74	169	239
4	5	2011	18	50	3.500	190	172
4	5	2011	19	57	4.000	190	172
4	5	2011	20	17	1.000	190	172
4	5	2011	20	37	2.500	190	172
4	5	2011	21	22	74	169	53

Tabela 21 – Registro de desempenho do sistema de correias transportadoras, histórico de uso.

Histórico de utilização das rotas do sistema de correias transportadoras			
Tempo de Simulação	Rota	Peso transportado	Material Transportado
0,005	53	33	20
0,005	122	900	39
0,005	53	17	34
0,005	81	17	34
0,005	231	970	38
0,012	2	413	39
0,012	123	299	1
0,015	2	413	39
0,015	123	202	16
0,018	2	413	39
0,022	2	413	39
0,237	360	468	35
0,261	356	520	1
0,293	302	585	36
0,293	360	585	35
0,669	356	1.188	1

Apresenta-se na **Tabela 22** o registro de ocorrências de falta de matéria-prima no alto-forno 3. Cada evento digno de nota é registrado para posterior avaliação do desempenho do cenário. Neste caso, o cenário simulado resultou em falta de matéria-prima para o alto-forno 3, o que não é aceitável por causar perda de produção de ferro gusa. O usuário, neste caso, intervém no cenário e busca uma nova situação em que isso não aconteça.

Tabela 22 – Registro de ocorrências de falta de matéria-prima no alto-forno 3.

Falta de matéria-prima no alto-forno 3	
4/5/2011 (7:21) - Falta de 186 toneladas da matéria-prima 21.	
4/5/2011 (8:26) - Falta de 167 toneladas da matéria-prima 21.	
4/5/2011 (8:35) - Falta de 198 toneladas da matéria-prima 21.	
4/5/2011 (8:39) - Falta de 139 toneladas da matéria-prima 21.	
4/5/2011 (8:48) - Falta de 190 toneladas da matéria-prima 21.	
4/5/2011 (10:31) - Falta de 74 toneladas da matéria-prima 35.	
4/5/2011 (10:39) - Falta de 75 toneladas da matéria-prima 35.	
4/5/2011 (10:44) - Falta de 76 toneladas da matéria-prima 35.	
4/5/2011 (10:49) - Falta de 78 toneladas da matéria-prima 35.	
4/5/2011 (10:55) - Falta de 79 toneladas da matéria-prima 35.	

A **Tabela 23** mostra parte do registro de resultados dos *stackers reclaimers* (SR's), onde pode-se observar o registro do manuseio de matérias-primas realizadas pelos SR's para os setores consumidores e processadores de matérias-primas, para um cenário específico.

Tabela 23 – Registro de desempenho dos *stackers reclaimers* por unidade produtiva.

Desempenho dos Stackers Reclaimers				
Área	SR 1	SR 2	SR 3	Total (t)
Alto-Forno 1	1.545	-	-	1.545
Alto-Forno 2	75	-	-	75
Alto-Forno 3	-	-	-	-
Calcinação 1	-	2.528	-	2.528
Calcinação 2	-	-	-	-
Recebimento	6.216	6.216	24.000	36.432
Blendagem	8.144	5.254	-	13.398
Retorno do Alto-Forno 3	-	4.113	-	4.113
Sinterização	-	2.096	-	2.096
Sinter do Pátio	-	-	-	-
Total (t)	15.980	20.207	24.000	60.188

A **Tabela 24** mostra parte do registro de resultados de desempenho de todos os equipamentos do sistema, onde se observa:

- O registro de utilização dos sistemas de correias transportadoras, onde também existe a opção de verificar o registro de cada correia transportadora que compõe o sistema;
- O registro de utilização dos equipamentos do sistema;
- O registro de utilização dos equipamentos do sistema de recebimento de matérias-primas.

Tabela 24 – Registro de desempenho de todos os equipamentos do sistema.

Resumo de utilização dos sistemas de Correias Transportadoras (CT's)			
Sistemas de CT's	Peso (t)	Tempo (h)	Produtividade (t/ h)
Sistema L	5.301	4,3	1.219
Sistema B	14.849	10,9	1.357
Sistema M	38.625	21,5	1.798
Sistema D	6.204	7,6	820
Sistema F	517	1,1	457
Sistema S	14.329	16,4	875
Sistema R	3.293	8,8	373
Sistema K	3.528	5,6	630
Sistema L Novo	9.084	4,8	1.896
Resumo de utilização dos equipamentos do sistema			
Equipamentos	Peso (t)	Tempo (h)	Produtividade (t/ h)
Stacker Reclaimer 1 (SR1)	17.243	8,3	2.067
Stacker Reclaimer 2 (SR2)	14.220	7,4	1.930
Stacker Reclaimer 3 (SR3)	19.335	8,3	2.328
Resumo de utilização do sistema de recebimento de matérias-primas			
Sistemas de recebimento	Peso (t)	Tempo (h)	Produtividade (t/ h)
Virador de vagões	19.296	10,6	1.812
Hopper ferroviário	4.200	4,8	875
Hopper rodoviário	3.100	4,1	756
Sistema H	12.166	6,5	1.858

As **Figuras 59, 60 e 61** apresentam os gráficos de nível de silos do AF3, dos silos de pelotas e o gráfico de utilização do virador de vagões, porém é possível obter os gráficos de nível de silos de todo o sistema, separados por setor. O gráfico de desempenho

dos sistemas de correias transportadoras e o gráfico de desempenho dos equipamentos das unidades produtivas são apresentados nas 62 e 63.

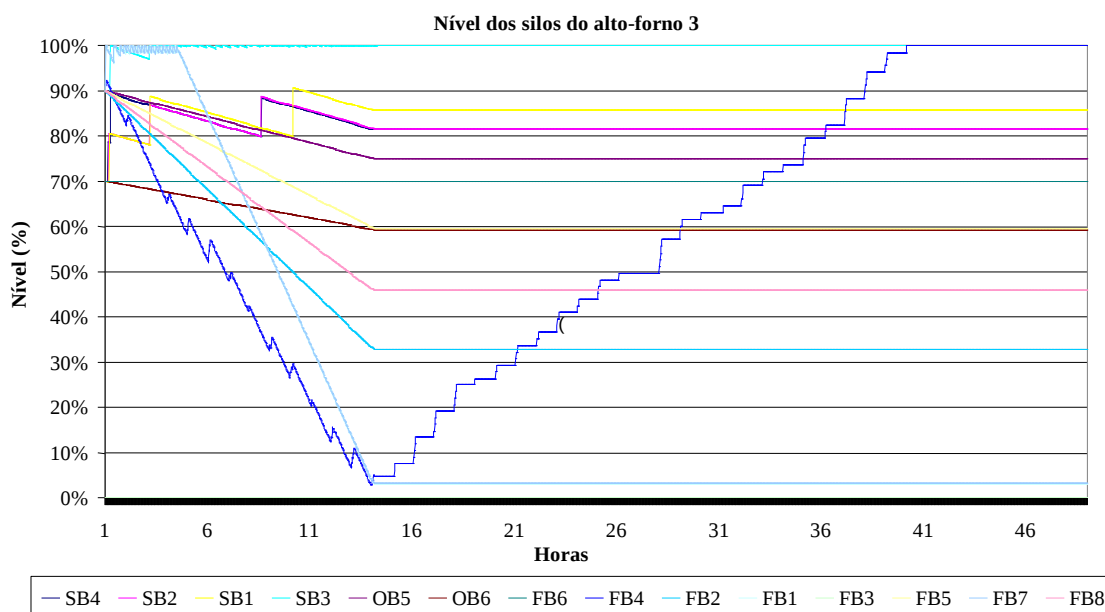


Figura 59 – Nível dos silos do AF3.

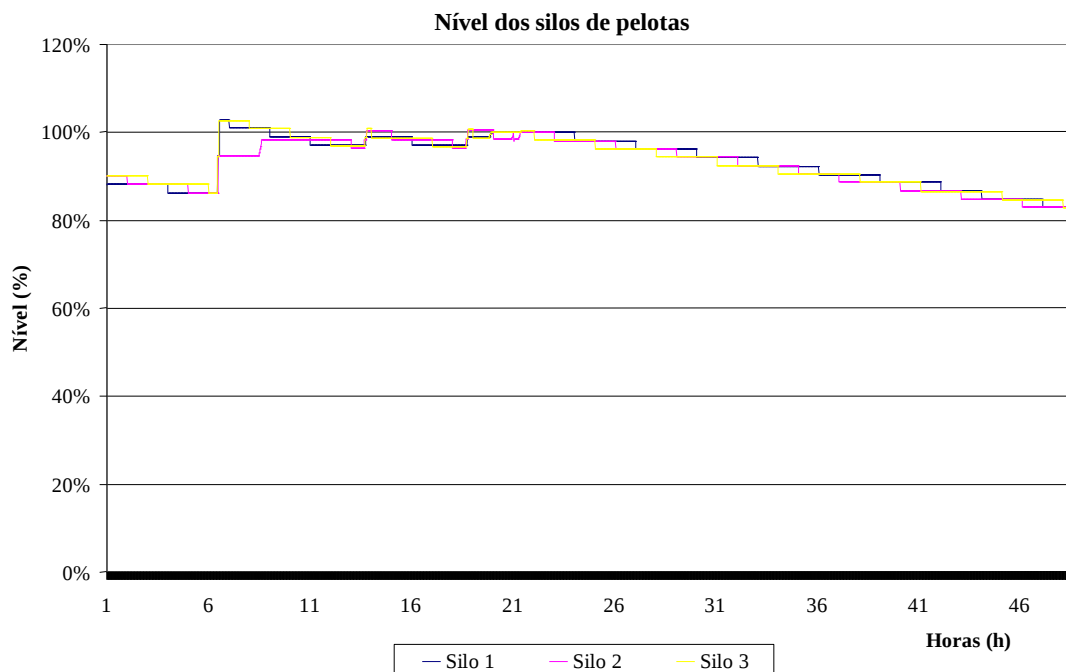


Figura 60 – Nível dos silos de recebimento de pelotas.

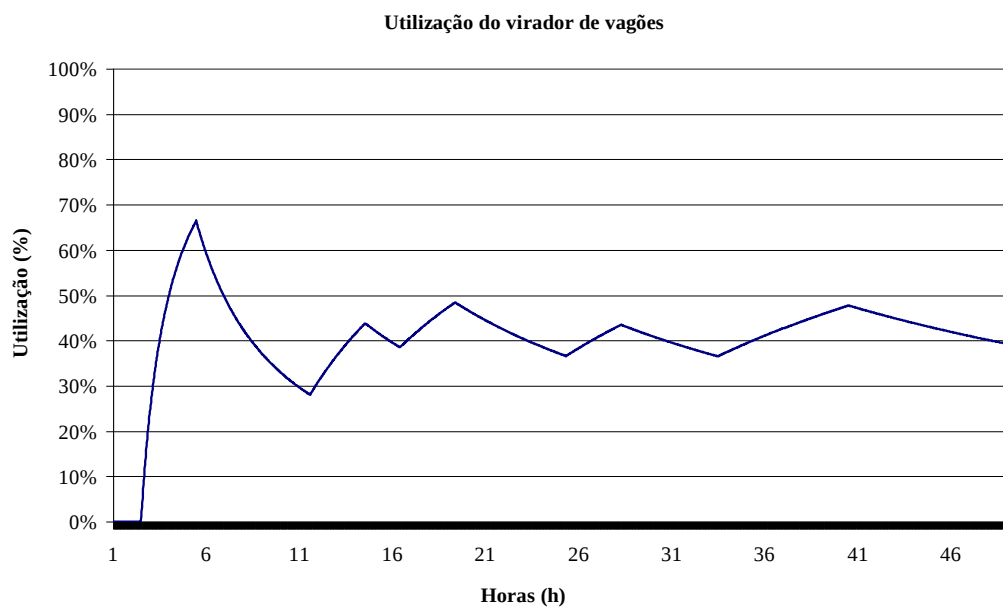


Figura 61 – Utilização do virador de vagões.

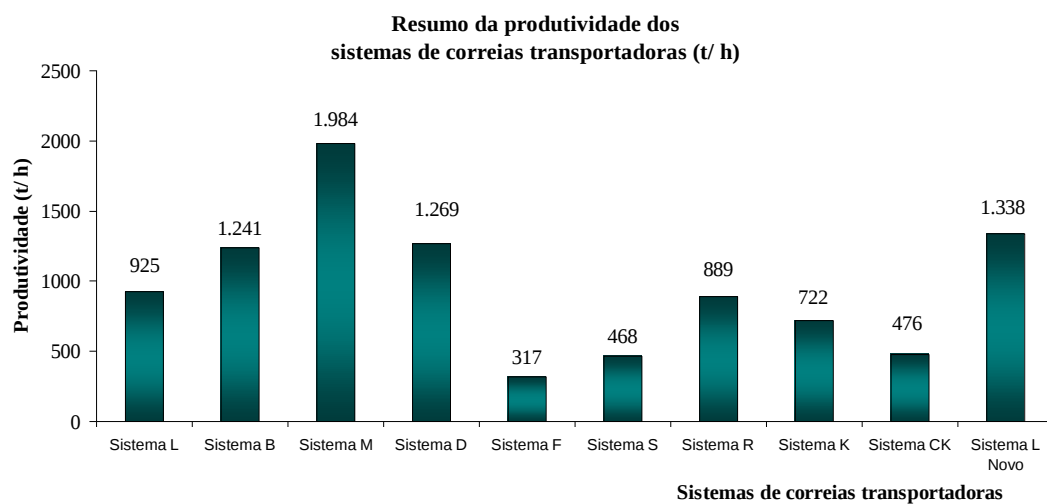


Figura 62 – Produtividade dos sistemas de correias transportadoras.

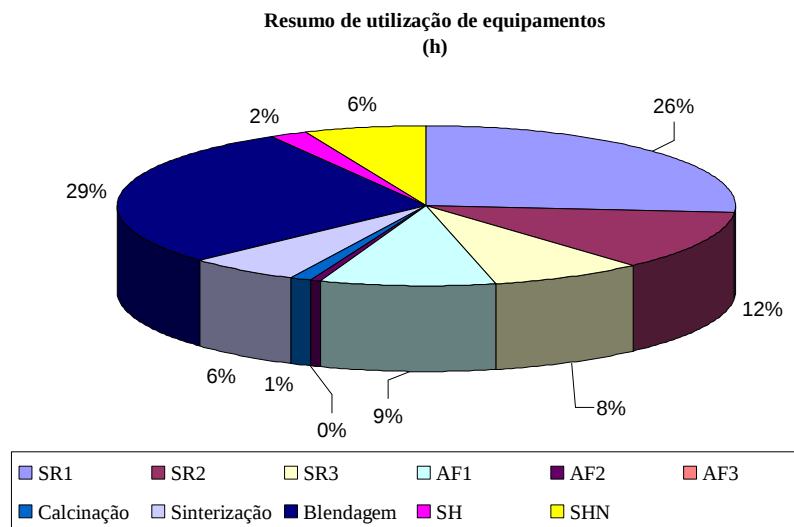


Figura 63 – Utilização dos equipamentos do sistema.

Uma nova etapa de testes está atualmente em curso na própria área operacional, que poderá adotar a simulação operacional como ferramenta para tomada de decisão, contribuindo desta forma com a gestão do pátio de matérias-primas.

CAPÍTULO 6 - IMPLEMENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta é a etapa onde realizou-se a apresentação dos resultados aos supervisores e gerentes da área de recebimento e manuseio de matérias-primas, onde evidenciou-se que o modelo poderia contribuir com a programação do pátio de matérias-primas. Nesta etapa elaborou-se um manual de operação do modelo de forma a nortear os supervisores e os programadores na utilização do modelo. Após, realizou-se rodadas de apresentação do modelo aos programadores, de forma a conscientizá-los da importância da ferramenta, e treiná-los no preenchimento das planilhas de interface, na geração de cenários, na análise e discussão dos resultados, no preenchimento do mapa do pátio de matérias-primas.

6.1 Manual de operação do pátio de matérias-primas

O objetivo da elaboração do manual de operação do pátio de matérias-primas foi instruir, passo a passo, o usuário a configurar adequadamente a interface do modelo, capacitando-o a parametrizar o sistema e elaborar os cenários, analisando os resultados obtidos e definindo a estratégia adequada para o curto prazo.

O simulador é composto por dois componentes: *interface* e *modelo*, permitindo aos usuários desenvolverem simulações e análises baseados no modelo desenvolvido em ARENA, conforme observa-se na **Figura 64**.

- **Interface:** desenvolvida em planilha formato MS-Excel, tem por objetivo proporcionar uma interação amigável entre o usuário e o modelo, sendo responsável por armazenar parâmetros de entrada (cenários) que alimentarão o modelo, e também disponibilizar os resultados gerados pelo mesmo de forma prática e de fácil interpretação, a fim de permitir a tomada de decisão.
- **Modelo:** construído utilizando o Software Arena versão 11 é responsável em recriar as propriedades e características do sistema real de recebimento e manuseio de matérias-primas, criando um ambiente “virtual”, que é usado para testar as teorias desejadas.

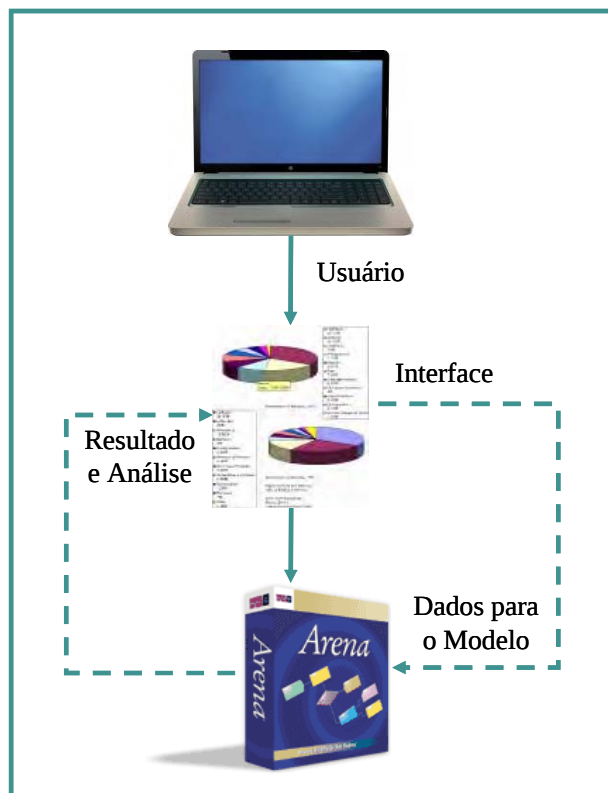


Figura 64 – Fluxo esquemático do simulador.

Fonte: Adaptada pelo autor

A **Figura 65** apresenta a tela inicial da interface de operação, acionada a partir dos ícones instalados na área de trabalho.

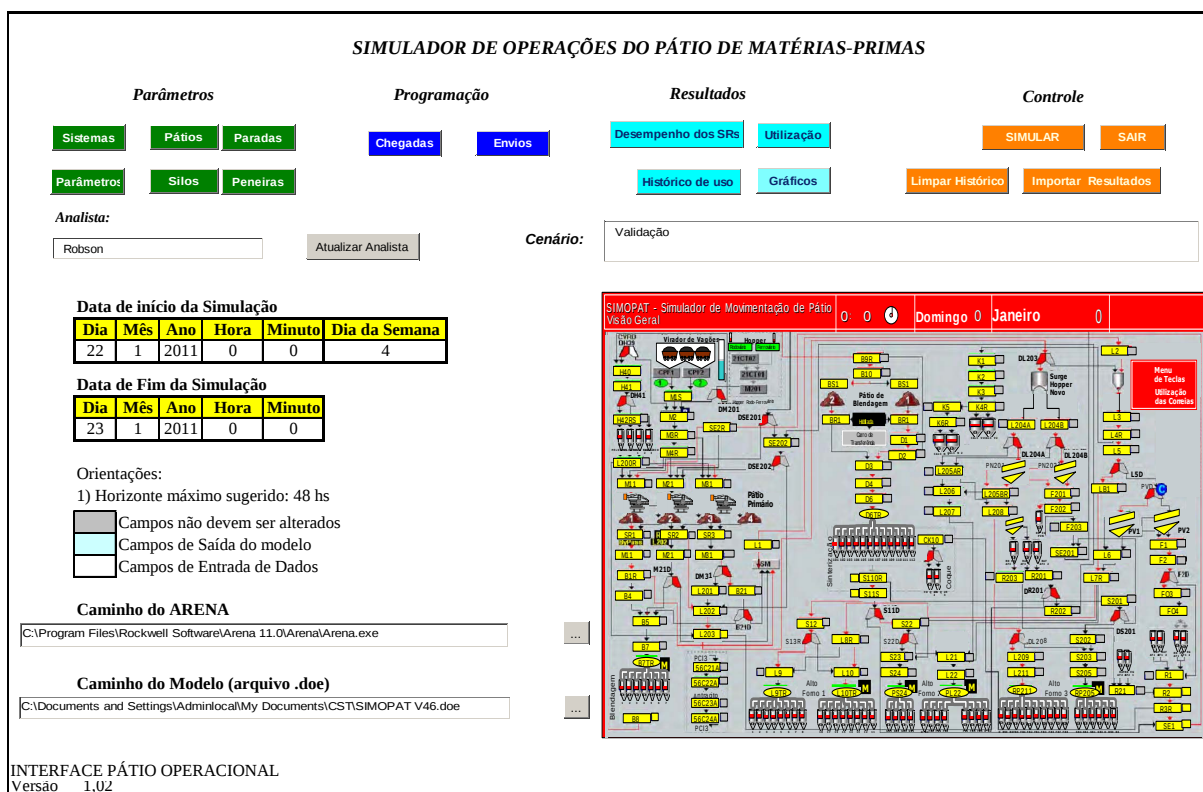


Figura 65 – Navegador principal.

A seguir faz-se uma descrição de todos os itens (ícones) da interface de operação, apresentando as entradas e saídas do modelo.

Parâmetros:

- **Sistemas:** abas de cadastro das capacidades das correias transportadoras relacionando as diversas matérias-primas com o sistema a ser utilizado;
- **Parâmetros:** informações sobre tempos de descarga de vagões de minério no virador e fundentes no *hopper* ferroviário, nos estados seco e úmido, tempo de descarga de caminhões e rendimento da sinterização;
- **Pátio:** informações sobre o volume de matérias-primas armazenados em cada pátio, separado por baliza (baliza é a distância entre dois pontos consecutivos no pátio igual a 5m);
- **Silos:** parâmetros para configuração individualizada de cada silo do sistema, com informações sobre o volume dos silos, taxa de consumo, níveis em termos percentuais e tamanho do lote enviado;

- **Paradas:** Controle de falhas dos equipamentos, onde deve ser definido se o equipamento irá sofrer falhas (no menu sim/ não) e caso afirmativo, qual o horário de início e término da falha;
- **Peneiras:** Entrada de dados de percentual de degradados relativos as peneiras novas, velhas do sistema, ou seja, peneiras da fase 7,5 Mt/ ano e da fase 5,0 Mt/ ano respectivamente.

Programação:

- **Chegadas:** Programação de chegadas de matérias-primas através do virador de vagões, *hopper* rodo-ferroviário, e via correia transportadora.
- **Envios:** Programação de envios de matérias-primas do *hopper* rodoviário para o sistema.

Resultados:

- **Desempenho do *stacker reclaimer*:** planilha de resultados de desempenho dos *stackers reclaimers* relacionado com os diversos destinos possíveis;
- **Histórico de uso:** registros de utilização dos equipamentos no sistema, bem com ocorrência de falta de produtos;
- **Utilização:** apresenta as informações de utilização das correias transportadoras com informações de: peso transportado, tempo de operação, taxa de ocupação e produtividade do sistema de correias transportadoras;
- **Gráficos:** consolidação das informações do modelo apresentadas de maneira visual.

Controles da interface e do modelo:

- **Simular:** botão que executa a simulação;
- **Limpar histórico:** botão que limpa os dados do cenário atualmente carregado na interface;
- **Importar resultados:** botão pressionado após a execução do modelo para a importação dos arquivos da pasta de trabalho para a interface;
- **Sair:** finaliza o excel.

Dados de cenário:

- **Caminho do software Arena:** Caminho na máquina de trabalho que se encontra o Arena para execução do modelo;
- **Caminho do arquivo:** caminho em que se encontra o modelo (arquivo.doe) para execução do modelo, importação de resultados e gravação de cenários;
- **Nome do analista:** nome do profissional que opera o modelo, este campo irá aparecer nas páginas impressas das planilhas selecionadas, caso altere o nome, deve-se pressionar o botão “Atualizar Analista” e aguardar o processamento;
- **Nome do cenário:** nome do cenário atual para catalogação e registro.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusão

O comportamento correto do simulador permitiu que a equipe do pátio de matérias-primas considerasse o estudo muito bem sucedido.

A metodologia inédita, utilizada para desenvolvimento do modelo do pátio de matérias-primas, permitiu a elaboração do modelo com o mínimo de retrabalho e com grande consistência. A elaboração da especificação detalhada do modelo operacional, com a participação da equipe do pátio, permitiu uma modelagem com pouco retrabalho. O fluxograma lógico de funcionamento do sistema de recebimento e manuseio de matérias-primas foi fundamental para entendimento, delimitação e modelagem do sistema do pátio de matérias-primas.

Os resultados dos cenários, com paradas emergenciais indicaram, aos supervisores do pátio de matérias-primas, a melhor seqüência de atividades a seguir, de forma, a permitir o retorno da operação do sistema, com segurança e qualidade.

Os resultados dos cenários, com paradas programadas dos equipamentos, mostraram a flexibilidade do simulador, permitindo a identificação prévia de gargalos e possibilitando a tomada de ações corretivas para evitá-los nas situações reais.

Para as situações de recebimento de matérias-primas simultâneas o simulador mostrou-se bastante eficiente, apontando também para estas situações, a melhor maneira de operar o pátio de forma a evitar desabastecimento de matérias-primas, contribuindo sobremaneira para a gestão unificada dos pátios primários com a utilização do modelo para tomada de decisão.

O preenchimento do mapa do pátio, a partir de resultados de cenários consistentes, foi um grande avanço, no sentido de automatizar esta atividade.

A realização deste estudo revelou que grande parte dos conceitos válidos para simulações com foco estratégico/ tático perdem a importância quando o estudo é operacional. A diferença mais relevante é a ausência de aleatoriedade. O modelo não pode ser estocástico, mas sim determinístico.

A quantidade de dados necessária para um estudo como esse também é muito grande, visto que, além de todo o comportamento inerente aos equipamentos do processo, é necessário que se estabeleça uma condição inicial, ou de partida para o sistema. Essa condição inicial é de implementação bastante complexa, além de requerer grande volume de informações. O estado de todas as filas precisa ser configurado, assim como o volume inicial de cada silo e todo material que está em trânsito.

Constatou-se que a participação intensa da equipe que opera o sistema real é essencial para a correta representação do sistema, visto que na prática sempre existem detalhes não documentados ou cuja documentação é desatualizada.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Uma alternativa para desenvolvimento futuro, neste e em outros projetos semelhantes, é interligar a interface de entrada de dados do modelo com o sistema supervisório, visto que a maior parte das informações necessárias para o seu estado inicial se encontra neste sistema.

A aplicação da técnica de simulação de eventos discretos, para avaliação de processos e verificação do desempenho dos mesmos, pode ser aplicada em outros processos produtivos de uma siderúrgica integrada, tais como: produção e manuseio do coque, aciaria, despacho de placas e bobinas, entre outros.

REFERÊNCIAS

AMBROSIO, Cristina Weber. **Modelo computacional para análise do desempenho de um processo semi-contínuo de distribuição de gás - LDG**. 2007 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). PPGEP / Centro de Tecnologia / Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2007.

AMBRÓSIO, Cristina Weber; SILVA, L. B. ; MONTENEGRO, Luiz Cláudio Monteiro. Simulation of LDG gas distribution system to thermoelectric plants in steelmaking company. In: ISDSI2008, 2008, Ghaziabad. **International Conference on Decision Sciences and Technology for Globalisation**, 2008.

BANKS, J. **Handbook of simulation**: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice. New York: Wiley-Interscience Publishers, 1998.

BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON; B.L. **Discrete-event system simulation**. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BAPAT, V.; STURROCK, D. T. (2003) – The Arena Product Family: Enterprise Modeling Solutions. Proceedings of the 2003 **Winter Simulation Conference**.

CARRIE, A. **Simulation of manufacturing systems**. United Kingdom: John Wiley & Sons, 1988.

CARSON II, John S. Introduction to Modeling and Simulation. In: **Winter Simulation Conference**, 2004, Washington DC.

CARVALHO, Duílio D. T. **Metodologia de Análise do Desempenho da Usina de Concentração da Samarco Mineração S.A. Baseada em Simulação das Operações**. 2003. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

CASTRO NETO, Laherce R. **Modelagem e Simulação da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro**. 2006. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Coelho, Robson Jacinto. **Modelos de previsão de qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno piloto de coqueificação da CST**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2003.

Coelho, Robson Jacinto. **Modelo de simulação operacional do manuseio de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada**. 2008. Projeto de Pesquisa (Especialização em Engenharia de Produção). Centro Universitário Vila Velha, 2008.

Coelho R.J.; Cuzzuol, J.; Fioroni M.M.; Harano E.L.M.; Lima J.S.; Mendes J.B.; Santos R.B. Estudo de expansão do sistema de manuseio de matérias-primas da CST através de simulação. In: **60º CONGRESSO ANUAL DA ABM**. Belo Horizonte, MG, 25 - 28 jul., 2005.

Coelho R.J.; Costhek, B.P; Cuzzuol, J.; Fioroni, M.M.; Franzese, L.A.G.; Harano, E.L.M.; Lima J.S.; Mendes J.B.; Santos R.B; Silva, A.S. Simulation based decision for steelmaking operations challenges. In: **Winter Simulation Conference**, pg 2657-2662. Orlando, Florida, USA, 2005.

COSTHEK, Benedito Pedro. **Estudo das metodologias para comparar software de simulação discreta de um sistema siderúrgico**. 2008 82 f. il: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) PPGE / Centro de Tecnologia / Campus I / Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 2008.

D'Audenhove, M.; Abreu, J. **Estudo de caso Belge**. Rio de Janeiro, 2001.

D'Audenhove, M; Coelho, R. J.; Cuzzuol, J., Ramos, R. A. **Estudo de caso Belge**. Rio de Janeiro, 2004.

D'Audenhove, M; L. J. S. **Estudo de caso Belge**. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.belge.com.br/indlog.php>>.

D'Audenhove, M; Souza, R. E. **Estudo de caso Belge**. Rio de Janeiro, 2007.

D'Audenhove, M; Jesus, C. A. E. **Estudo de caso Belge**. Rio de Janeiro, 2008.

D'Audenhove, M; Santos, T. F. E. **Estudo de caso Belge**. Rio de Janeiro, 2009.

FIORONI, Marcelo M. et al. Simulation of Continuous Behavior Using Discrete Tools: Ore Conveyor Transport. In: **Winter Simulation Conference**, 2007, Washington DC.

Fioroni M.M.; Franzese, L.A.G. **Estudo de caso Paragon**. São Paulo, 2001.

Fogliatti, M. C., Mattos, N. M. C., **Teoria de Filas**. Rio de Janeiro: Interferência, 2007.

FREITAS FILHO, Paulo José de. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: Com Aplicações em Arena**. Florianópolis: Visual Books, 2001. v. 1.

GAVIRA, Muriel de O. **Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento**. 2003. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

HARRELL, C.; TUMAY, K. **Simulation made easy: a manager's guide**. Norcross, Georgia: Engineering & Management Press. 1995.

KELTON, D. W., SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation With Arena**. New York: McGraw Hill, 1998.

KELTON, W. David et al. **Simulation With Arena**. 2 ed. New York: McGraw Hill, 2001.

KELTON, D. W., SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation With Arena**. New York: McGraw Hill, 2003.

_____. (2004) **Simulation With Arena**. Boston: McGraw Hill. 3 ed. 2004.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation Modelling and Analysis**. 2 ed. New York: McGraw Hill, 1991.

_____. (2000). **Simulation Modelling and Analysis**. 3 ed. Boston: McGraw-Hill.

MORAIS, Marcos A. C. **Análise da Operacionalidade do Terminal de Produtos Siderúrgicos do Porto de Praia Mole**. 2001. 77p. Monografia (Especialização Logística em Transportes). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

MOTA, V.F. **Curso da Teoria da Semelhança**. UFRGS, 1972, p. 11-135.

NANCE, Richard E.; OVERSTREET, C. Michael. Characterizations and Relationships of World Views. In: **Winter Simulation Conference**, 2004, Washington DC.

PIDD, M., **Computer Simulation In Management Science**. John Wiley & Sons, 1992.

PIDD, M. An Introduction to Computer Simulation. In: **Winter Simulation Conference**, p.7-14, 1994.

PIDD, M. Five Simple Principles of Modeling. In: **Winter Simulation Conference**, p.721-728, 1996.

PEGDEN, C.D. et al. **Introduction to Simulation Using SIMAN**. Mc Graw Hill.1990.

PRADO, Darci. **Usando o Arena em Simulação**. 3 ed. Belo Horizonte: INDG – Instituto de Desenvolvimento Gerencial, 2008.

PRITCHETT, Amy R. et al. Hybrid-System Simulation for National Airspace System Safety Analysis. In: **Winter Simulation Conference**, 2000, Orlando.

Rizzo, E. M. S. **Noções básicas de siderurgia**, Vitória, ES, 2004.

SHANNON, R.E. Introduction to the art and science of simulation. In: **Winter Simulation Conference**, 1998.

_____. Introduction to Simulation. In: **Winter Simulation Conference**, p. 65-73, 1992.

SARGENT, Robert G. Validation and Verification of Simulation Models. In: **Winter Simulation Conference**, 2004, Washington DC.

Silva, A.S; Costhek, B.P; Fioroni M.M. Modelo Operacional da Aciaria da CST. In: **60° CONGRESSO ANUAL DA ABM**. Belo Horizonte, MG, 25 - 28 jul., 2005.

SILVA, Luiz Bueno. **Modelagem & Simulação**. (Apostila). Centro de Tecnologia da UFPB, João Pessoa, 2008.

VAN BEEK, D. A.; ROODA, J. E. Languages and Applications In Hybrid Modelling and Simulation: Positioning of Chi. **Control Engineering Practice**, Eindhoven, v. 8, n.1, p. 81-91, 2000.

ANEXO A: Exemplo de rotas do sistema de recebimento de matérias-primas

ROTA 1 - Virador de vagões para o pátio primário via SR1					
Rota 1 (CT's utilizadas):	M1-S	M-2	M-3R	M-4R	M-11
Capacidade do sistema (t/ h)	3.600 t/ h				
Matérias-primas transportadas	Minério Fino	Pelotas	Minério Granulado		
ROTA 2 - Virador de vagões para o pátio primário via SR2					
Rota 2 (CT's utilizadas):	M1-S	M-2	M-3R	M-4R	M-21
Capacidade do sistema (t/ h)	3.600 t/ h				
Matérias-primas transportadas	Minério Fino	Pelotas	Minério Granulado		
ROTA 3 - Virador de vagões para o pátio primário via SR3					
Rota 3 (CT's utilizadas):	M1-S	M-2	M-3R	M-4R	M-31
Capacidade do sistema (t/ h)	3.600 t/ h				
Matérias-primas transportadas	Minério Fino	Pelotas	Minério Granulado		
ROTA 4 - Virador de vagões para a sinterização via SR1					
Rota 4 (CT's utilizadas):	M1-S	M-2	M-3R	M-4R	M-11
	B-1R	B-4	B-5	B-7	B-8
	B-9R	D-2	D-3	D-4	D-6
Capacidade do sistema (t/ h)	1.650 t/ h				
Matéria-prima transportada	Minério Fino				
ROTA 5 - Virador de vagões para a sinterização via SR2					
Rota 5 (CT's utilizadas):	M-1S	M-2	M-3R	M-4R	M-21
	B-5	B-7	B-8	B-9R	D-2
	D-3	D-4	D-6		
Capacidade do sistema (t/ h)	1.650 t/ h				
Matéria-prima transportada	Minério Fino				
ROTA 6 - Virador de vagões para a sinterização via SR3					
Rota 6 (CT's utilizadas):	M-1S	M-2	M-3R	M-31	B-21
	B-5	B-7	B-8	B-9R	D-2
	D-3	D-4	D-6		
Capacidade do sistema (t/ h)	1.650 t/ h				
Matéria-prima transportada	Minério Fino				