

Fábio Yoshiteru Nukui
Plínio Kenzo Hida

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO E
SUSTENTABILIDADE DE CADEIA DE SUPRIMENTOS**

São Paulo
2012

Fábio Yoshiteru Nukui
Plínio Kenzo Hida

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO E
SUSTENTABILIDADE DE CADEIA DE SUPRIMENTOS**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a conclusão do curso de
Engenharia Mecatrônica.

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Nukui, Fábio Yoshiteru

Modelagem e análise de desempenho e sustentabilidade de cadeia de suprimentos / F.Y. Nukui, P.K. Hida. -- São Paulo, 2012. 107 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Cadeia de suprimentos 2. Sustentabilidade 3. Sistemas discretos 4. Redes de Petri I. Hida, Plínio Kenzo II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.

Dedicatória

À minha família, amigos e colegas.

Fabio Yoshiteru Nukui

Aos meus pais, Osvaldo e Noemia; e aos meus amigos, que sempre me incentivaram e motivaram.

Plínio Kenzo Hida

Agradecimentos

Ao professor Paulo Eigi Miyagi, pela orientação e pelos valiosos conselhos transmitidos nas aulas e ao longo deste ano.

À colega Célia Hanako Kano, pelo auxílio e orientação no projeto, além do apoio na elaboração do texto.

Ao Rafael e Denise Jaquery, que permitiram a análise de sua empresa familiar e forneceram os dados para formular o modelo deste trabalho.

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de uma cadeia de suprimentos.....	17
Figura 2 – Procedimento para análise de sistemas por simulação	21
Figura 4 – Exemplo de disparo em uma rede de Petri (RP)	24
Figura 3 – Exemplo de modelo feito no ProModel	25
Figura 5 – Exemplo de um lugar e suas características.....	28
Figura 7 – Exemplo de transição de substituição.....	29
Figura 8 – Comparação entre o mesmo exemplo de processo modelado no HPSim e o CPN Tools.....	30
Figura 9 - Fronteira de produção e eficiência técnica.....	32
Figura 10 - Produtividade, eficiência técnica e economia de escala.....	33
Figura 11 – Exemplo do método do Barômetro da sustentabilidade.....	38
Figura 12 - Visão geral da cadeia de suprimentos	41
Figura 13 - Bobinas de aço carbono no estoque de matéria-prima.....	44
Figura 14 - Detalhe das ferramentas utilizadas na estampagem das porcas	45
Figura 15 - Detalhe da matéria-prima entrando na estamparia.....	45
Figura 16 - <i>Blanks</i> resultantes da estampagem.....	46
Figuras 17 e 19 – Porcas embaladas em saco plásticoe caixas plásticas.....	47
Figura 18 - Geração de pedidos	52
Figura 19 - Tratamentos dos pedidos	53
Figura 20 - Processo de emissão de pedidos de matéria-prima.....	55
Figura 21 - Pedidos e entregas de matéria-prima	55
Figura 22 - Fila de pedidos dos clientes indo para o <i>buffer</i> de estampagem.....	56
Figura 23 – Preparação para a estampagem	58
Figura 24 - Estampagem	58
Figura 25 - Processo de limpeza após a estampagem	60
Figura 26 - Preparação para o rosqueamento	61
Figura 27 - Limpeza após o rosqueamento	62
Figura 28 - Inspeção das porcas.....	63
Figura 29 - Embalagem das porcas	65
Figura 30 - Entrega do pedido aos clientes e devolução das caixas	66

Figura 31 - Taxas de utilização das estampadeiras.....	68
Figura 32 - Entrada de pedidos e saídas de produtos	68
Figura 33 - Matéria prima entrando na fábrica	69
Figura 34 - Aço saindo na fábrica como sucata	69
Figura 35 - Gráfico com os dados de uma simulação.....	71
Figura 36 - Caixas necessárias por demanda anual de porcas	72
Figura 37 - Caixas quebradas por demanda anual de porcas	73
Figura 38 - Sacos (em milhares) necessários por demanda anual de porcas	73
Figura 39 - Comparação entre a Pegada Ecológica acumulada com o uso de caixas plásticas e de sacos.	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados de cada tipo de porca.....	49
Tabela 2 - Tamanho do lote e faixa de pedidos das porcas	51
Tabela 3 - Informações das estamparias consideradas.....	57
Tabela 4- Informações das rosqueadeiras	61
Tabela 5 - Critérios de validação	67
Tabela 6 - Dados brutos de uma simulação	70
Tabela 7 - Resultados das simulações	71
Tabela 8 - Necessidade acumulada de caixas plásticas.....	74
Tabela 9 - Necessidade acumulada de sacos plásticos	74
Tabela 10 - Pegada Ecológica acumulada para o uso de caixas plásticas.....	75
Tabela 11 - Pegada Ecológica acumulada para o uso de sacos plásticos.....	75
Tabela 12 - Lotes produzidos por cenário anual de demanda de porcas	77
Tabela 13 - Custo de embalagem por lote	77

Sumário

Lista de Figuras.....	6
Lista de Tabelas.....	8
Resumo.....	12
Abstract	13
1. Introdução	14
1.1. Objetivo.....	15
1.2. Organização do texto	15
2. Fundamentos	16
2.1. Cadeia de suprimentos	16
2.1.1. Logística reversa	17
2.2. Sistema produtivo	18
2.3. Sistema a Eventos Discretos (SED)	19
2.4. Modelagem e simulação.....	19
2.4.1. Procedimento para a simulação do modelo	21
2.4.2. Técnica de modelagem - Rede de Petri (RP).....	23
2.4.3. Rede dePetri Colorida (RPC)	24
2.4.4. Ferramentas de software para modelagem e simulação de sistemas ...	25
2.5. Medidas de desempenho	31
2.5.1. Fator total de produtividade.....	31
2.5.2. Produtividade e eficiência	31
2.5.3. Produtividade nas empresas.....	33
2.6. Sustentabilidade	33
2.6.1. Desenvolvimento sustentável.....	34
2.6.2. Ferramentas de avaliação do desenvolvimento sustentável.....	35
2.7. Discussão	38
3. Estudo de caso	40

3.1.	Formulação do problema	40
3.2.	Definição dos objetivos e planejamento geral.....	41
3.3.	Coleta de dados e descrição da cadeia de suprimentos.....	42
3.3.1.	Pedidos de clientes	42
3.3.2.	Pedidos de matéria-prima	43
3.3.3.	Entrada de matéria-prima	43
3.3.4.	Estoque de matéria-prima	43
3.3.5.	Estampagem	44
3.3.6.	Limpeza após a estampagem.....	46
3.3.7.	Rosqueamento.....	46
3.3.8.	Limpeza após o rosqueamento	46
3.3.9.	Inspeção.....	47
3.3.10.	Embalagem	47
3.3.11.	Transporte aos clientes.....	48
3.4.	Concepção do modelo	48
3.4.1.	Pedidos de clientes	50
3.4.2.	Pedidos de matéria-prima	54
3.4.3.	Entrada de matéria-prima	55
3.4.4.	Estoque de matéria-prima	56
3.4.5.	Estampagem	57
3.4.6.	Limpeza após a estampagem.....	59
3.4.7.	Rosqueamento.....	60
3.4.8.	Limpeza após o rosqueamento	62
3.4.9.	Inspeção.....	63
3.4.10.	Embalagem	64
3.4.11.	Transporte aos clientes.....	65
3.5.	Verificação do modelo	66
3.6.	Validação do modelo	67
3.7.	Projeto do experimento	69

3.8.	Execução do modelo e análise	71
3.8.1.	Análise da Pegada Ecológica	74
3.8.2.	Análise do custo de embalagens por lote produzido.....	77
4.	Conclusão	79
	Referência Bibliográfica	81
	APÊNDICE	84
4.1.1.	Declarações Padrão	84
4.1.2.	I/O (<i>Input/Output</i>)	85
4.1.3.	Objetos do modelo.....	88
4.1.4.	Monitores	90
4.1.5.	RPC e Hierarquia.....	92
4.1.6.	Importação de dados externos.....	106

Resumo

O contexto onde as empresas estão inseridas está em constante mudança. A evolução tecnológica, a exigência de processos sustentáveis e o aumento da competitividade demandam um contínuo aprimoramento em busca de ganhos de eficiência e adequação a padrões mais rígidos de preservação dos recursos naturais.

Assim, os processos produtivos e a cadeia de suprimentos associado a esses processos são constantemente objeto de estudos visando o aumento do desempenho e sustentabilidade.

Baseando-se nas características estruturais e funcionais das cadeias de suprimentos, estas podem ser vistas como sistemas a eventos discretos. Assim, é possível a modelagem e análise da cadeia de suprimentos utilizando Redes de Petri Coloridas.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo a modelagem de uma cadeia de suprimentos e o levantamento de indicadores de desempenho e de sustentabilidade. Para tanto, foi feito um estudo de caso envolvendo a troca de embalagens na cadeia de suprimentos de uma empresa e de seus clientes.

Por meio dessa modelagem e análise, obteve-se a produção máxima da cadeia de suprimentos e o número de caixas necessárias para suprir essa produção. Com esses dados, foi possível o levantamento de um indicador do desempenho financeiro e de um indicador de sustentabilidade ambiental da utilização de insumos no setor de embalagens do estudo de caso.

Palavras chave: cadeia de suprimentos; sustentabilidade; sistema a eventos discretos; rede de Petri colorida.

Abstract

The context in which firms are embedded is constantly changing. Technological developments, the requirement for sustainable processes and the increase in competitiveness demand a continuous improvement in pursuit of efficiency gains and meeting higher standards of preservation of natural resources.

Therefore, the productive processes and the associated supply chain are constantly object of studies aiming the increase of performance and sustainability.

Based on the structural and functional characteristics of supply chains, these can be viewed as a discrete event system. Thus, it is possible the modeling and analysis of the case study supply chain using Colored Petri Nets.

This work aims the modeling of a supply chain and creation performance and sustainability indicators. To that aim, a case study was made, involving the exchange of packaging in the supply chain of a company and its clients.

Through this modeling and analysis, it was obtained the maximum production of the supply chain and the number of boxes needed to meet this production. With this data, it was possible to create an indicator of financial performance and an indicator of environmental sustainability of input use in the packaging sector of the case study.

Keywords: supply chain; sustainability; discrete events system; colored Petri net.

1. Introdução

As empresas estão inseridas em um contexto no qual elas precisam ser competitivas. Se o produto ou serviço oferecido não corresponde aos interesses do consumidor, este pode encontrar outro fornecedor mais adequado para atendê-lo. Ferraz (1997) define competitividade como a capacidade da empresa formular e implantar estratégias concorrenciais, que lhe permitam ampliar ou conservar, de forma duradoura, uma posição sustentável no mercado. A palavra “sustentável”, utilizada pelo autor, neste caso, refere-se à viabilidade financeira da empresa em questão, ou seja, ela precisa ser rentável após a implantação de sua estratégia competitiva.

A competitividade empresarial, quase inexistente há algumas décadas, em função do incentivo governamental aos grandes cartéis, foi inserida no ambiente das empresas junto com o progresso econômico mundial, acelerado com a recuperação alemã e japonesa no pós-guerra (adaptado de Porter, 1980).

De forma semelhante, o tema de sustentabilidade ambiental, antes discutido apenas nos círculos de ambientalistas, tornou-se um ponto central nas discussões de governos e empresas. Organizações ambientais fazem pressão para a implantação de índices que incluem a sustentabilidade ambiental na composição da riqueza dos países, e não apenas na sua produção econômica dos países, como o PIB (IHD e PNUMA, 2012).

No Brasil, diversas instituições, com o apoio do Ministério do Meio Ambiente, se juntaram em uma iniciativa de inserir o tema da sustentabilidade no ambiente corporativo, com o Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE), em 2005. O ISE foi criado como um “selo de qualidade” para empresas que possuíssem um compromisso comprovado com a sustentabilidade social e ambiental.

Este trabalho se insere neste contexto buscando um alinhamento entre desempenho financeiro e sustentabilidade ambiental, através da análise de impactos

ambientais e econômicos da análise da cadeia de suprimentos de um sistema produtivo que engloba diferentes empresas.

1.1. Objetivo

Este projeto tem como objetivo a modelagem e a análise da cadeia de suprimentos de uma empresa e seus clientes. Como estudo de caso visando à melhoria de índices de sustentabilidade, é analisada a mudança das embalagens atualmente utilizadas por outras mais duráveis, que favoreçam a redução de custos e a diminuição do descarte de resíduos sólidos da cadeia de suprimentos.

O trabalho visa medir os impactos dessa mudança na eficiência produtiva e econômica da empresa e de seus clientes, além do impacto ambiental na forma de redução de resíduos sólidos descartados.

1.2. Organização do texto

No capítulo 2, são revisados os fundamentos considerados no desenvolvimento do trabalho, além das ferramentas utilizadas para a modelagem e análise. No capítulo 3, a cadeia de suprimentos analisada como estudo de caso é descrita e os parâmetros e premissas da construção do modelo são apresentados. Em seguida, os resultados da simulação e a análise dos mesmos são detalhados. No capítulo 4, as conclusões extraídas do trabalho são discutidas.

2. Fundamentos

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos e ferramentas as quais serão utilizadas ao longo do trabalho.

Os conceitos de cadeia de suprimentos, sistema produtivo, sistemas a eventos discretos, modelagem e sustentabilidade serão definidos e as ferramentas de análise de desempenho e do nível de desenvolvimento sustentável serão descritos.

2.1. Cadeia de suprimentos

Algumas definições para cadeia de suprimentos (*supply chain*) são:

“Cadeia de suprimentos é o alinhamento de empresas que levam os produtos ou serviços ao mercado” (Lambert, 1998).

“Cadeia de suprimentos é uma rede de instalações e opções de distribuição que realiza as funções de aquisição de materiais, transformação destes em produtos intermediários e finais, e a distribuição desses produtos acabados para os consumidores” (Ganeshan, 1995).

A gestão da cadeia de suprimentos é definida como a coordenação da produção, estoque, localização, transporte e informação entre os participantes da cadeia para atingir o melhor *mix* de eficiência e atendimento de necessidades para o mercado no qual se situa (Hugos, 2003).

A

Figura 1 representa um exemplo de cadeia de suprimentos e seus participantes.

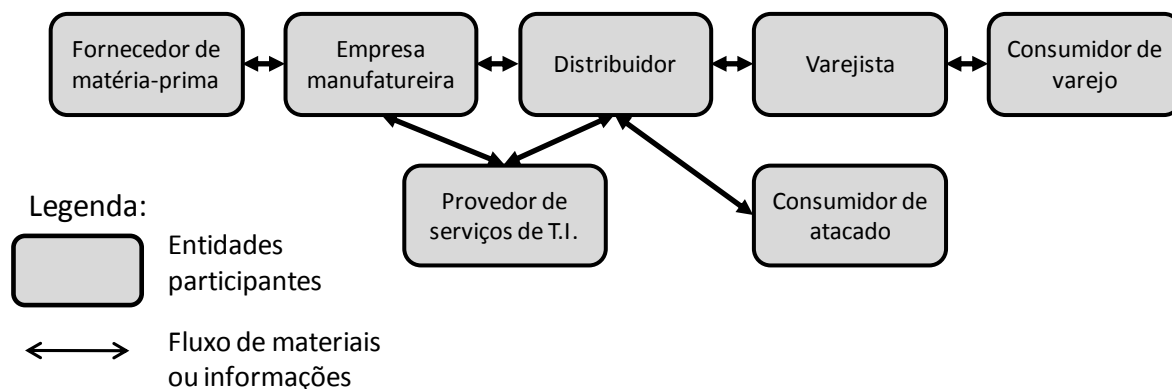


Figura 1 – Exemplo de uma cadeia de suprimentos (adaptado de Hugos, 2003, p. 27)

Baseado nas definições acima, conclui-se que o foco da "cadeia de suprimentos" está na caracterização funcional de cada entidade participante de uma rede de empresas e fluxos de materiais e informações. Neste sentido existe um conjunto de processos produtivos relacionado com a fabricação efetiva de produtos, mas também existe um outro conjunto de processos relacionados com a viabilização e suporte imprescindíveis à fabricação dos produtos. O segundo caso envolve a infraestrutura de transporte, empacotamento, acondicionamento de matérias-primas, produtos intermediários, etc.

2.1.1. Logística reversa

Logística reversa abrange as atividades dentro da cadeia de suprimentos nas quais produtos não mais necessários pelos usuários são recolocados de alguma forma no mercado (adaptado de Fleischmann, 1997).

Vários autores utilizam como classificação dos tipos de reuso na logística reversa em quatro categorias: reuso, reparo, reciclagem e remanufatura. Reuso consiste no reuso direto de itens sem a necessidade de reparos (possivelmente após uma limpeza ou manutenção mínima). Reparo tem como objetivo trazer produtos quebrados (no sentido de produtos que de alguma forma não apresentam mais as funcionalidades previstas) a um “estado de funcionamento” novamente.

Reciclagem é a recuperação de material do produto sem a conservação da estrutura do produto original. Remanufatura, em contraste, conserva as características dos produtos e busca trazê-los a um estado de “novos”.

2.2. Sistema produtivo

Uma definição de sistema produtivo apresentada em (Coelli, 2005) é a de uma unidade de tomada de decisão que converte insumos em produtos. Outra definição de sistema produtivo é a de um sistema que processa entidades físicas de forma a produzir bens ou serviços (Miyagi, 2007). Exemplos são: sistemas de manufatura, sistemas de transportes e de construção.

Quando comparado com a definição de "cadeia de suprimentos", entende-se que existe uma intersecção com a definição de sistema produtivo. Se de um lado a "cadeia de suprimentos" pode envolver várias entidades, cada um com seu "sistema produtivo", de outro, um "sistema produtivo", em uma visão mais ampla é que envolve a "cadeia de suprimentos" de vários sub-produtos que compõem um produto final.

No presente trabalho, será utilizada a interpretação de que um sistema produtivo está inserido como parte da cadeia de suprimentos, sendo responsável pelo processamento da matéria-prima, convertendo-a em um produto o qual é utilizado como insumo por outra empresa, portanto, outro sistema produtivo. Cada sistema produtivo descrito ao longo do trabalho refere-se a uma única unidade empresarial que converte insumos em produtos, de forma que essas unidades estão alinhadas na cadeia de suprimentos para levar um produto ou serviço ao consumidor final no mercado, adotando a definição de Lambert (1998).

2.3. Sistema a Eventos Discretos (SED)

O estudo de sistemas a eventos discretos é baseado em *frameworks* de modelagem, nos quais a dinâmica do sistema é dirigida pela ocorrência de diferentes eventos de um conjunto específico de eventos (Cassandras, 2008). Estes eventos têm a característica de serem instantâneos e que definem uma mudança abrupta do estado do sistema. Este estado de sistema é, por sua vez, de natureza discreta.

O controle de SED é o controle que, baseado num procedimento pré-estabelecido ou numa lógica fixa que executa ordenadamente cada estágio do controle (Miyagi, 1996).

Principais características do controle de SED:

- A transição dos estados pode ocorrer de forma concomitante e simultânea.
- O dispositivo de realização do controle deve possuir funções básicas como operações lógicas, memorização e temporização (Miyagi, 1996)

A cadeia de suprimentos e seus processos produtivos podem ser tratados um SEDs em função da dependência entre a evolução dos estados do sistema e a ocorrência de eventos (Miyagi, 1996) (Cassandra, Lafortune, 2008). Por exemplo, o transporte dos produtos finais só ocorre após a embalagem dos mesmos, que por sua vez, só acontece após a inspeção de cada unidade fabricada.

2.4. Modelagem e simulação

Para analisar o comportamento e o desempenho de um sistema que ainda não existe ou de um sistema existente, mas no qual é inviável uma intervenção ou interferência em seu funcionamento, é necessário primeiramente obter um modelo de

sua estrutura e funcionamento. Na obtenção de um modelo, deve-se conciliar simplicidade e precisão nos resultados de sua análise (Ogata, 2006).

O modelo é assim uma forma de representação simplificada de um sistema, mas deve de alguma forma processar e manipular os principais dados e variáveis de interesse. Assim, é normal o caso de se desenvolver diferentes modelos de um mesmo sistema, de acordo com o tipo de aspecto a ser estudado.

A simulação, por sua vez, é entendida como a “imitação” de uma operação ou de um processo do mundo real (Miyagi, 2006). Um processo ou sistema pode ser analisado através do modelo de simulação, sendo possível a experimentação de mudanças no sistema e a verificação de seus impactos no modelo antes de testá-las no sistema real. Ao tratar de um sistema, entende-se um grupo de objetos que estão agregados de acordo com uma relação de interdependência para atingir certos objetivos.

Outras aplicações e vantagens da modelagem e simulação de um sistema, segundo Miyagi (2006), são:

- Identificação das principais variáveis de um sistema e do modo de interação entre elas por meio de uma análise das entradas e saídas resultantes;
- Estudo das interações internas de um sistema complexo, ou de um subsistema dentro de um sistema complexo;
- Realização de alterações nas informações, na organização e no ambiente do sistema para observar seus efeitos;
- Aquisição de maior conhecimento sobre o modelo de simulação e sobre o processo de desenvolvimento do modelo para melhorias do sistema.
- Manipulação do tempo da forma desejada, assim como realizar repedidas simulações, em caso de manuseio de variáveis aleatórias.

Neste trabalho, será utilizada a simulação de sistemas a eventos discretos pelo método numérico, ou seja, empregando ferramentas computacionais para executar os modelos matemáticos.

2.4.1. Procedimento para a simulação do modelo

Os procedimentos necessários para analisar e validar os resultados da simulação de um modelo são descritos na metodologia sugerida por Miyagi (2006). A Figura 2 abaixo ilustra a metodologia proposta, seguida da explicação simplificada de cada etapa da metodologia de concepção do modelo e da análise da simulação:

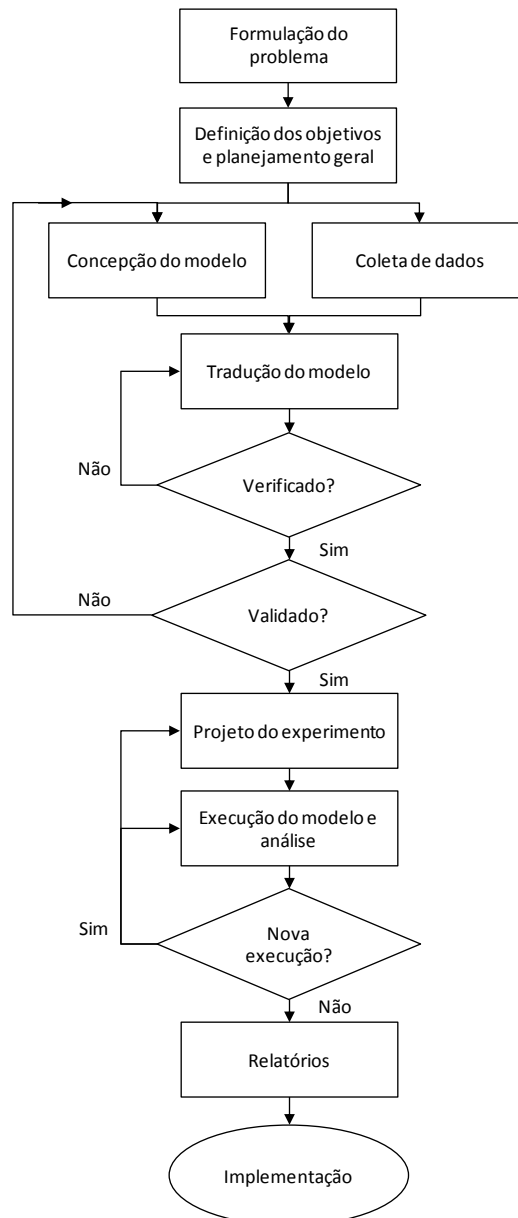


Figura 2 – Procedimento para análise de sistemas por simulação (adaptado de Miyagi, 2006)

- **Formulação do problema:** Entendimento do sistema e definição do problema a ser simulado;

- Definição dos objetivos e planejamento geral: Identificação das questões que devem ser respondidas pela simulação e avaliar se a simulação é a técnica mais adequada para respondê-las. Se a simulação for apropriada, o planejamento geral deve incluir uma especificação das alternativas que devem ser consideradas, e um critério para comparar os resultados;
- Concepção do modelo e coleta de dados: A coleta de dados está diretamente relacionada com a concepção do modelo, pois as informações necessárias variam de acordo com a complexidade do modelo. Tal complexidade não deve ser maior do que a necessária para responder as questões levantadas na definição dos objetivos;
- Tradução do modelo: O projetista do modelo decide em qual linguagem ou *software* serão editados os dados, isto é, edição do modelo de simulação.
- Verificado?: Deve-se verificar nesta etapa se o programa de computador executa o modelo conforme o esperado;
- Validado?: A validação é a confirmação de que o modelo é uma representação adequada do sistema real. A validação geralmente é um refinamento do modelo, comparando seus dados com o do sistema real e usando as discrepâncias para melhorar o modelo;
- Projeto do experimento: Detalhamento das alternativas e/ou cenários que serão simulados, normalmente quanto à magnitude dos valores de inicialização, ao tempo de simulação e o número de repetições que devem ser feitas;
- Execução do modelo e análise: São realizadas para estimar as medidas de desempenho e para a comparação dos cenários propostos com o modelo do sistema original;
- Realização de nova simulação?: Tomada de decisão referente a validade do dados obtidos, verificando se há necessidade de ajustes nos cenários ou de mais repetições na simulação;
- Relatórios: Envolvem a documentação do programa (do modelo de simulação) e dos experimentos. A documentação do programa é indispensável para a confiabilidade dos dados gerados, ao usar o modelo. A documentação

dos experimentos é necessária para justificar a validade da solução recomendada.

- Implementação: Aplicação da mudança proposta no sistema real.

O procedimento descrito anteriormente possui etapas bem definidas e que facilitam a condução do trabalho.

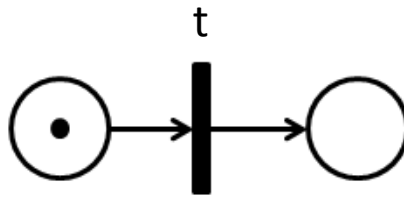
2.4.2. Técnica de modelagem - Rede de Petri (RP)

Segundo Cassandra e Lafortune (2008), Miyagi (1996) a rede de Petri é uma técnica para a modelagem de SEDs, isto é, a rede de Petri (RP) é uma técnica formal e gráfica para modelar sistemas concorrentes e assíncronos na presença de conflitos, exclusão mútua e restrições de sincronização (Murata, 1989).

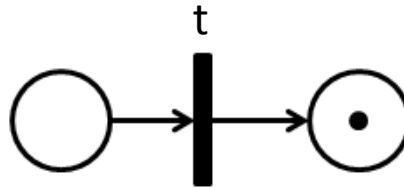
Uma RP é um modelo gráfico de um sistema a eventos discretos, e consiste de lugares, transições e arcos direcionados, que são representados por círculos, retângulos e flechas, respectivamente.

Lugares podem conter um número qualquer de marcas, as quais são representadas por pequenos círculos no interior dos lugares. A alteração do número de marcas entre lugares ocorre de acordo com o de disparo de transições. O disparo só pode ocorrer quando há pelo menos uma marca em cada lugar apontando para uma transição. Após o disparo, uma marca é removida de cada lugar que precedia a transição, e novas marcas são colocadas em cada lugar o qual a transição aponta.

Na Figura 3 é mostrado um exemplo de RP, antes e após um disparo.



(a) antes do disparo da transição t



(b) depois do disparo da transição t

Figura 3 – Exemplo de disparo em uma rede de Petri (RP)

2.4.3. Rede de Petri Colorida (RPC)

“Rede de Petri Colorida (RPC) é uma técnica de modelagem de sistema a eventos discretos que combina a rede de Petri com a linguagem de programação funcional Standart ML” (Wells, 2006).

A RPC possui vantagens em relação a outros tipos de redes de Petri por permitir a diferenciação individual de cada elemento que percorre o sistema, reduzindo o número de lugares e transições. A presença de cores faz da RPC a ferramenta ideal para descrever sistemas que contêm muitos componentes similares (mas não idênticos) interagindo (Jensen, 1992).

2.4.4. Ferramentas de software para modelagem e simulação de sistemas

a) ProModel

O ProModel é uma ferramenta de simulação e animação concebida para modelar de forma rápida uma variedade de sistemas de manufatura (Baird, 1994). Devido a interface relativamente simples, que facilita o aprendizado, e a linguagem gráfica do software, o ProModel é utilizado com frequência por engenheiros e gerentes para a modelagem e simulação de sistemas.

A análise do sistema modelado (exemplo na Figura 4) é beneficiada pelos gráficos e tabelas que o programa disponibiliza após a simulação do processo manufatureiro. A possibilidade de simular horas de trabalho em poucos segundos é uma das características principais deste software.

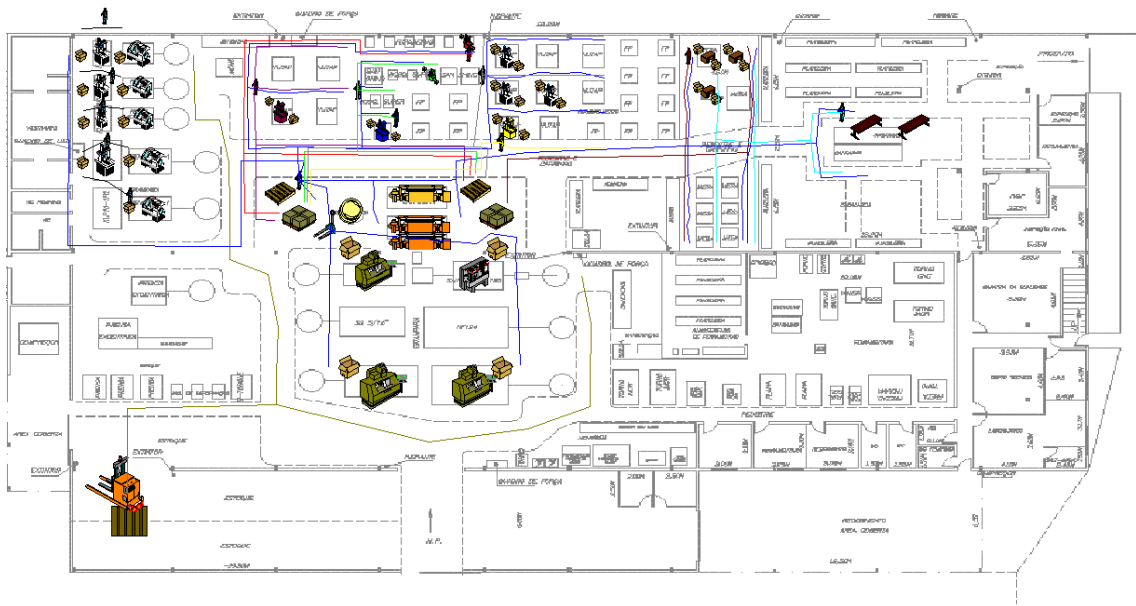


Figura 4 – Exemplo de modelo feito no ProModel (adaptado de Ascensão e Jaquery, 2010)

“Os elementos do modelo são compostos de forma sequencial em etapas diferentes. Estes fornecem os blocos para representar os componentes físicos e lógicos do sistema a ser modelado” (Baird, 1994). O trabalho de Baird e Leavy descreve os elementos do ProModel da seguinte maneira:

- Locais (*locations*): elementos fixos no sistema onde as entidades são encaminhadas para o processamento, armazenagem ou simplesmente para a tomada de decisão de qual será a próxima rota.
- Entidades (*entities*): referem-se a itens a serem processados no sistema. Estes incluem a matéria-prima, partes de peças, cargas e também o produto final.
- Rotas (*path networks*): são elementos opcionais e definem os possíveis caminhos que as entidades e os recursos podem percorrer ao se moverem ao longo do sistema. As rotas são constituídas de nós conectados por segmentos e são definidas graficamente a partir de simples cliques no mouse.
- Recursos (*resources*): um recurso pode ser uma pessoa, máquina ou veículo utilizado para transporte de material entre locais; para realizar uma operação em um local ou realizar a manutenção em um local ou em outro recurso que esteja quebrado.
- Processamento (*processing*): este elemento define a sequência de operações ou serviços e a lógica do fluxo de entidades entre os locais. A operação ou os tempos de serviço, a lógica do fluxo, as necessidades de recursos, entidades e a relação entre entrada e saída e os tempos de movimentação podem ser definidos pelo elemento de processamento.
- Chegadas (*arrivals*): chegadas ou horários de produção determinísticos, condicionais ou estocásticos podem ser definidos por este elemento.
- Turnos de trabalho (*shifts*): esse elemento permite a definição de horários de trabalhos personalizados e paradas no processo produtivo.

O ProModel possui como vantagens a eficácia e rapidez com que se pode modelar o sistema e algumas características e também a possibilidade de extrair dados para análise dos gráficos e tabelas fornecidos após a simulação. Como desvantagem, ele possui capacidades de personalização limitadas, e não permite algumas operações, como individualização das entidades.

b) HPSim

O HPSim é um software de modelagem e simulação que se baseia na técnica de RP. Ele foi desenvolvido para a familiarização de alunos com conceitos de redes de Petri, e possui capacidades limitadas de monitoramento e análise, conforme descrito no *website* do programa (winpesim.de).

c) CPN Tools

O software livre Colored Petri Nets Tools (CPN Tools) permite a modelagem de sistemas com diversas variáveis e estados de forma relativamente sintética utilizando RCP. O CPN Tools também possui ferramentas de monitoração que facilitam a análise de desempenho do sistema.

Algumas das ferramentas adicionais na RPC e no CPN Tools, em relação à rede de Petri tradicional, são descritas a seguir, conforme apresentado no tutorial do próprio *software* (cpntools.org):

- Cores (*Color sets*): determinam o tipo de dados que um lugar pode conter. Uma cor é composta se for construída a partir de outras cores, caso contrário, ela é simples. As cores precisam ser declaradas no programa, de forma que o seu nome e o tipo de variável que a uma cor acomoda são definidos.
- Lugares: devem sempre estar associados a uma cor, e podem ter ou não um conjunto de marcas iniciais e um nome relacionado. A Figura 5 ilustra um exemplo de lugar com sete marcas iniciais, sendo que uma delas possui o valor inteiro “1”, outra possui o valor “2”, duas possuem o valor “3” e três possuem o valor “4”. O rótulo “INT” ao lado do lugar indica que a cor das marcas neste lugar abriga valores inteiros.

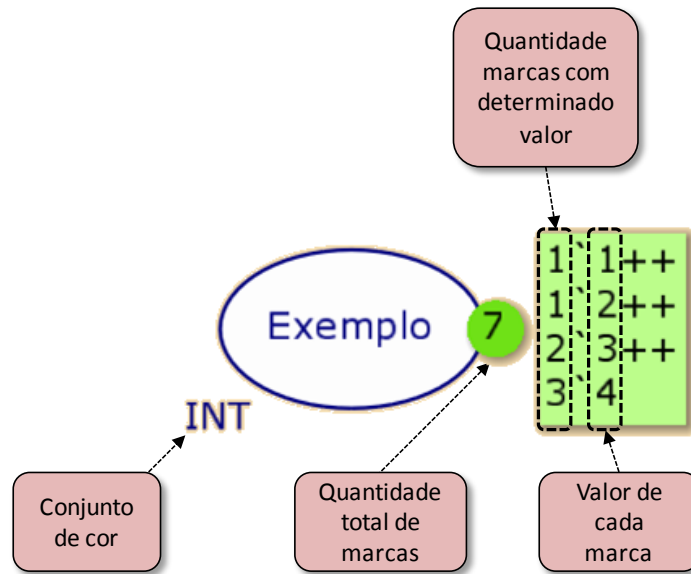


Figura 5 – Exemplo de um lugar e suas características

- Expressões em arcos: a cor na expressão do arco corresponde à cor do lugar associado ao arco. A expressão em um arco também pode conter uma condicional ou uma função.
- Inscrições em transições: as transições podem conter os parâmetros de nome, tempo de atraso, *guards* (expressão booleana, que precisa ter o valor de *true* para a transição disparar), prioridade, e uma ação.
- Variáveis: são identificadores cujos valores podem ser modificados durante a execução do modelo. Um *binding* é a associação de um valor a uma variável. O *binding* de uma variável só pode ser referenciado em determinado escopo, que é a transição com seus arcos e lugares relacionados.
- Hierarquia: a composição da RPC de um sistema por um conjunto de RPCs é possível. Partes da RPC global podem ser representadas sob a forma de transições de substituição. A Figura 6 ilustra a transição de substituição “Fornecedores”, a qual envolve as transições “Fornecedor 1” e “Fornecedor 2”.

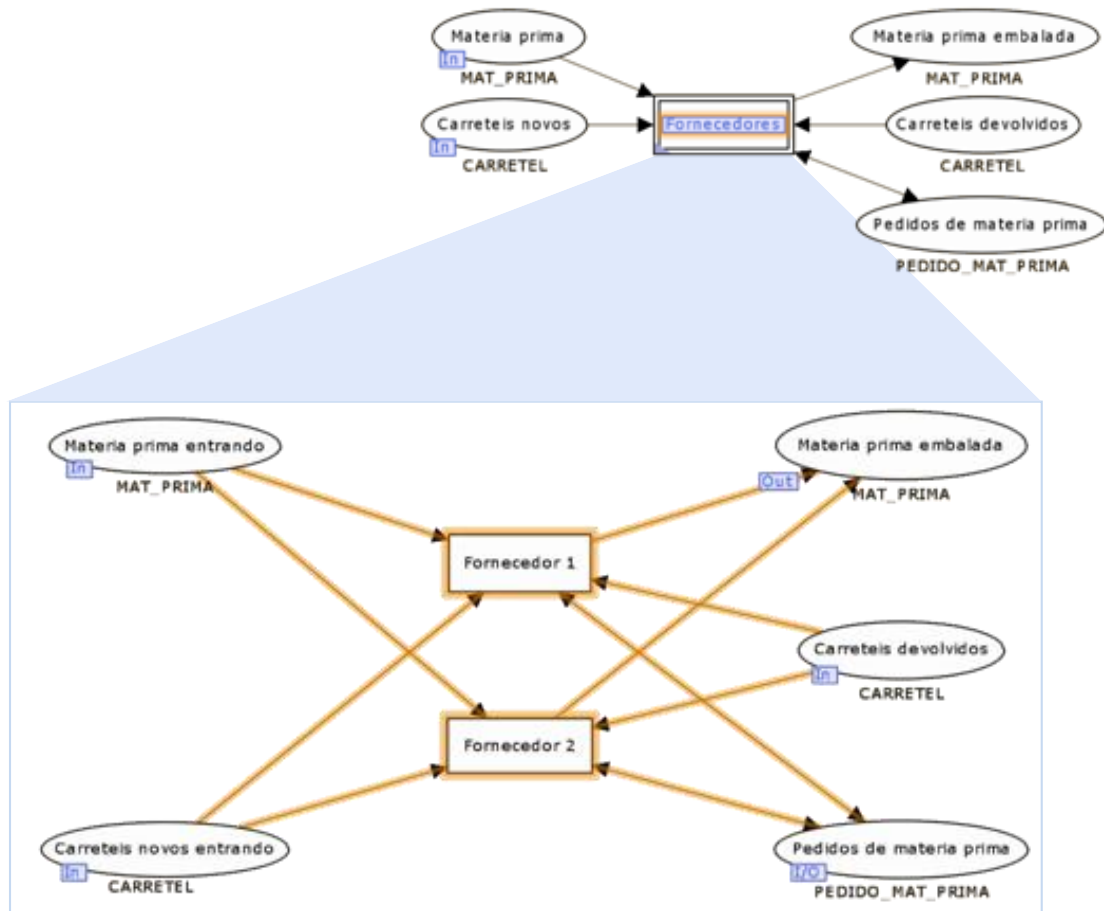


Figura 6 – Exemplo de transição de substituição

- Tempo simulado (simulated time): representação simbólica do tempo. O simulador contém um contador chamado de *clock*. O número no *clock* representa o tempo simulado em determinado momento. Uma marca pode ter um valor de tempo associado, chamado de marcador de tempo (*time stamp*). Essa marca está indisponível enquanto o valor no *clock* não for igual ou maior que seu marcador de tempo. Quando não há transições habilitadas na RPC, o simulador o incrementa o *clock* em no menor valor necessário para habilitar uma transição.

- Monitoração: mecanismo no CPN Tools capaz de observar, inspecionar, controlar ou modificar uma simulação da RPC. Os monitores podem ser utilizados, por exemplo, para contar o número de marcas em um lugar, contar o número vezes que uma transição dispara, parar a simulação quando um lugar está vazio, entre outras funcionalidades. Os monitores possibilitam a extração de dados quantitativos do modelo para análise do sistema.

d) Comparação entre as ferramentas de *software*

A Figura 7 ilustra um exemplo de sistema produtivo modelado no HPSim e no CPN Tools. Nota-se que o uso da RPC e das ferramentas do CPN Tools reduz a quantidade necessária de elementos no modelo, tornando sua aparência mais simples.

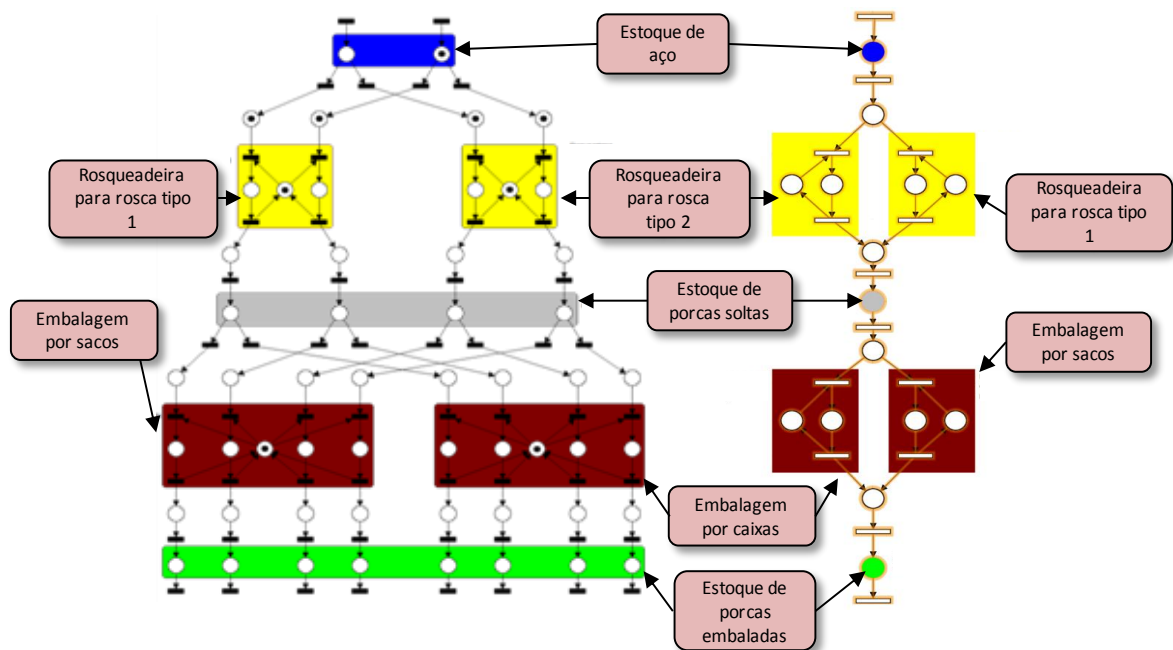


Figura 7 – Comparação entre o mesmo exemplo de processo modelado no HPSim (à esquerda) e o CPN Tools (à direita)

O ProModel possui características semelhantes à RPC em termos de número de elementos e de sua disposição gráfica nos modelos. O ProModel, no entanto, não

possui as características de hierarquização disponíveis no CPN Tools, tornando-o mais difícil de visualizar em sistemas com uma grande quantidade de elementos.

2.5. Medidas de desempenho

Neste trabalho, desempenho se refere a ambos os conceitos de produtividade e de eficiência de sistemas. A seguir são citados alguns dos conceitos referentes à produtividade e a eficiência.

2.5.1. Fator total de produtividade

Quando há mais de uma entrada no sistema, um método para agregar essas entradas em um único índice deve ser utilizado para a criação de uma única medida de produtividade. O fator total de produtividade é a medida de produtividade envolvendo todas as entradas e saídas (Coelli, 2005).

2.5.2. Produtividade e eficiência

Para ilustrar a diferença entre os termos “produtividade” e “eficiência”, utiliza-se um exemplo apresentado em Coelli, 2005, de uma fábrica relativamente simples no qual um único *input* (x) é utilizado para produzir um único *output* (y). Na Figura 8, a linha F' representa a fronteira de produção que pode ser utilizada para definir a relação entre o *input* e o *output*. Ela representa o máximo *output* atingível para cada nível de *input*.

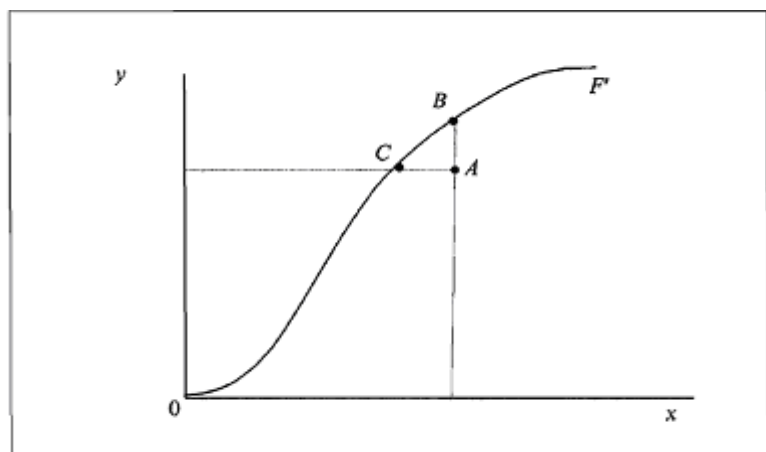


Figura 8 - Fronteira de produção e eficiência técnica (adaptado de Coelli, 2005)

Empresas que operam na fronteira, isto é, na linha F' , são tecnicamente eficientes, sendo que as que trabalham abaixo da fronteira não são. Na Figura 8, B e C indicam pontos de funcionamento tecnicamente eficientes, enquanto A representa um ponto de funcionamento ineficiente.

Na Figura 9, a diferença entre os termos pode ser explicada graficamente. Nesta imagem, utiliza-se uma reta que passa pela origem para medir a produtividade de um ponto específico. A inclinação da reta é y/x e fornece uma medida de produtividade. Se a empresa operando no ponto A mudar para o ponto tecnicamente eficiente B , a inclinação da curva seria maior, implicando em maior produtividade. Se a movimentação ocorrer para o ponto C , a reta partindo da origem é uma tangente a fronteira de produção, definindo então o ponto de produtividade máxima. O ponto C é o ponto (tecnicamente) ótimo, e pode ser atingido explorando a economia de escala. Operar em qualquer outro ponto na fronteira de produção resulta em uma menor produtividade.

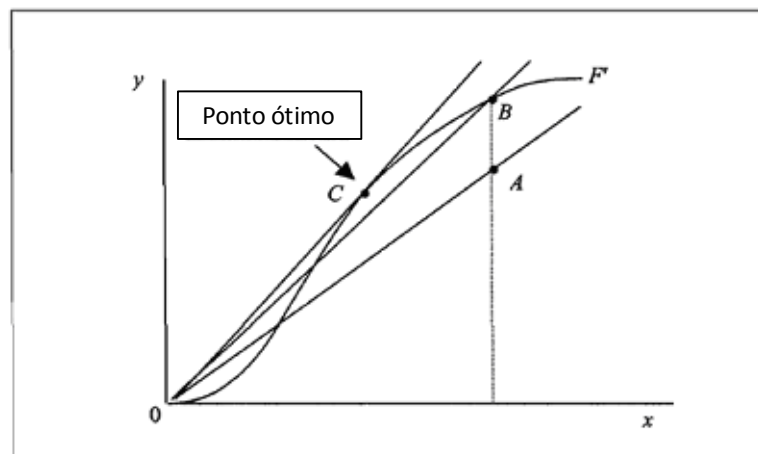


Figura 9 - Produtividade, eficiência técnica e economia de escala (adaptado de Coelli, 2005)

Dessa discussão, conclui-se que uma empresa pode ser tecnicamente eficiente, mas pode melhorar sua produtividade explorando a economia de escala.

2.5.3. Produtividade nas empresas

O objetivo principal da maioria das empresas é a obtenção de lucro com suas operações. Um dos fatores que influencia diretamente o lucro de uma empresa é o custo do produto vendido, o qual engloba o custo da matéria-prima, custo da mão de obra e da energia e manutenção das máquinas utilizadas na produção, transporte, manuseio e empacotamento de um bem. O lucro então é afetado pela maneira que a empresa utiliza seus recursos, seja o capital investido ou o tempo de seus funcionários.

Pode-se, por exemplo, considerar simplesmente que um *input* no processo produtivo é o capital investido na manufatura do produto final.

2.6. Sustentabilidade

Segundo Bordini (2011), a sustentabilidade envolve ações nos campos social, econômico e ambiental. A transição para um sistema que pode ser considerado sustentável é dificultada pela complexidade inerente desses domínios. Outra característica da sustentabilidade é seu senso de pertencer ao sistema como um todo, sendo um aspecto global que emerge dos processos internos na interação entre homem e ambiente.

Os itens seguintes apresentam os conceitos utilizados ao longo do trabalho, assim como a escolha e justificativa do método para medir o grau de sustentabilidade de uma cadeia de suprimentos.

2.6.1. Desenvolvimento sustentável

Em função dos benefícios sociais e ambientais, o conceito de desenvolvimento sustentável nas corporações tem sido cada vez mais valorizado, de forma que as empresas que adotam medidas sustentáveis possuem vantagens como o mercado de créditos de carbono (caso elas consigam reduzir a emissão de gases geradores do efeito estufa) ou a participação de índices como o Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) das empresas de capital aberto, citado anteriormente (www.isebvmf.com.br).

De acordo com a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, o desenvolvimento sustentável deve atender as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das futuras gerações atenderem suas próprias necessidades (WCED, 1987).

Sendo assim, a análise da sustentabilidade em um processo produtivo, no contexto atual de assegurar o bem-estar das gerações atuais e futuras, deve ser realizada em nosso trabalho observando de que formas se pode contribuir com o uso racional de insumos e com a diminuição de dejetos residuais que são despejados no meio ambiente.

2.6.2. Ferramentas de avaliação do desenvolvimento sustentável

Devido à dificuldade em mensurar o grau de desenvolvimento sustentável de um empreendimento, alguns métodos foram propostos a partir da década de 1990, quando a crise ambiental alcançou grande destaque como causa de preocupação nos modelos de produção e de desenvolvimento (adaptado de Van Bellen, 2004). Destacam-se na sequência, três dos principais métodos propostos para reproduzir o grau de sustentabilidade do desenvolvimento como um número ou escala.

a) *Ecological Footprint Method* (Método da Pegada Ecológica)

O método proposto por Wackernagel e Rees (1996) transforma o consumo de matéria-prima e a assimilação de dejetos de um sistema econômico ou população humana, em área correspondente de terra ou água produtiva (Van Bellen, 2004). O conceito da pegada ecológica começou a ser amplamente utilizado como ferramenta de análise e avaliação do grau de sustentabilidade de um sistema a partir dos livros *Our Ecological Footprint* (Wackernagel e Rees, 1996) e *Sharing Nature's Interest* (Wackernagel, Chambers e Simmons, 2000), os quais relatam a descrição do método e a teoria por trás deste.

A unidade da pegada ecológica é o "hectare global" (gha), sendo que uma atividade, população ou sistema consome uma quantidade adaptada à média global de bioprodutividade de uma área. Esta unidade possibilita a comparação entre diferentes países e tipos de terreno (National Footprint Accounts Method Paper, 2010). Isso permite uma comparação direta entre a utilização de recursos naturais de diferentes atividades utilizando-se uma única variável.

A fórmula simplificada para a pegada ecológica de extração de produtos ou geração de dejetos anual é calculada com a seguinte equação:

$$EF = \frac{P}{Y_w} \times EQF$$

Na qual:

EF = Pegada ecológica associada ao produto ou dejetos [gha]

P = quantidade de produto extraído ou dejetos gerado em [ton/ano];

Y_w = média mundial da quantidade de produto extraído ou dejetos absorvido em [ton/ano/wha], onde wha = hectare mundial médio;

EQF = fator de equivalência baseado em produtividade em [gha/wha], que converte um tipo de terreno específico (como uma área de plantio ou floresta) em uma unidade universal de bioprodutividade, o hectare global.

A fórmula simplificada acima supõe que o produto extraído ou dejetos gerado consome uma área equivalente de um tipo de solo específico. Um exemplo seria a extração de toras de madeira, a qual consome uma área em hectares de terras de florestas. O fator de equivalência (EQF) é utilizado para transformar os hectares de terras de florestas em hectares globais, e permitir a comparação e/ou consolidação com outros produtos extraídos. O EQF para um terreno arável, por exemplo, é maior do que o EQF de um terreno de pastagem e tipos de terreno com produtividade maior do que a média da produtividade de toda área terrestre ou aquática biologicamente produtiva possuem EQF maior que 1 (National Footprint Accounts Guidebook 2008).

b) *Dashboard of Sustainability* (Painel da Sustentabilidade)

O Painel da sustentabilidade foi desenvolvido pelo *Consultative Group on Sustainable Development Indicators* em conjunto com a iniciativa do desenvolvimento de indicadores pelo *Bellagio Forum for Sustainable Development*, e representa uma metáfora do painel de um automóvel. A representação gráfica do Painel é dividida em três grupos (*clusters*): qualidade ambiental, saúde social e desempenho

econômico. A representação procura refletir a situação de cada grupo, com uma seta indicando o nível de desempenho de cada grupo junto com um medidor de quantidade remanescente para alertar os recursos críticos. (Van Bellen, 2004).

Este método, no entanto, ainda está longe de sua versão final, segundo os autores. Para que a ferramenta se torne mais atrativa e relevante, os indicadores preliminares devem ser substituídos por indicadores reconhecidos internacionalmente. Em paralelo, é importante que alguma instituição forneça suporte no acompanhamento e atualização dos indicadores. (Van Bellen, 2004).

c) *Barometer of Sustainability* (Barômetro da Sustentabilidade)

O método do barômetro da sustentabilidade baseia-se em uma consolidação de indicadores das esferas do "bem-estar do ser humano" e do "bem-estar de ecossistema" e os coloca numa representação gráfica em escala de 0 a 100 para facilitar a identificação da situação de uma sociedade.

A aplicação deste método para alguns países latino-americanos e os resultados gráficos podem ser observados na Figura 10.

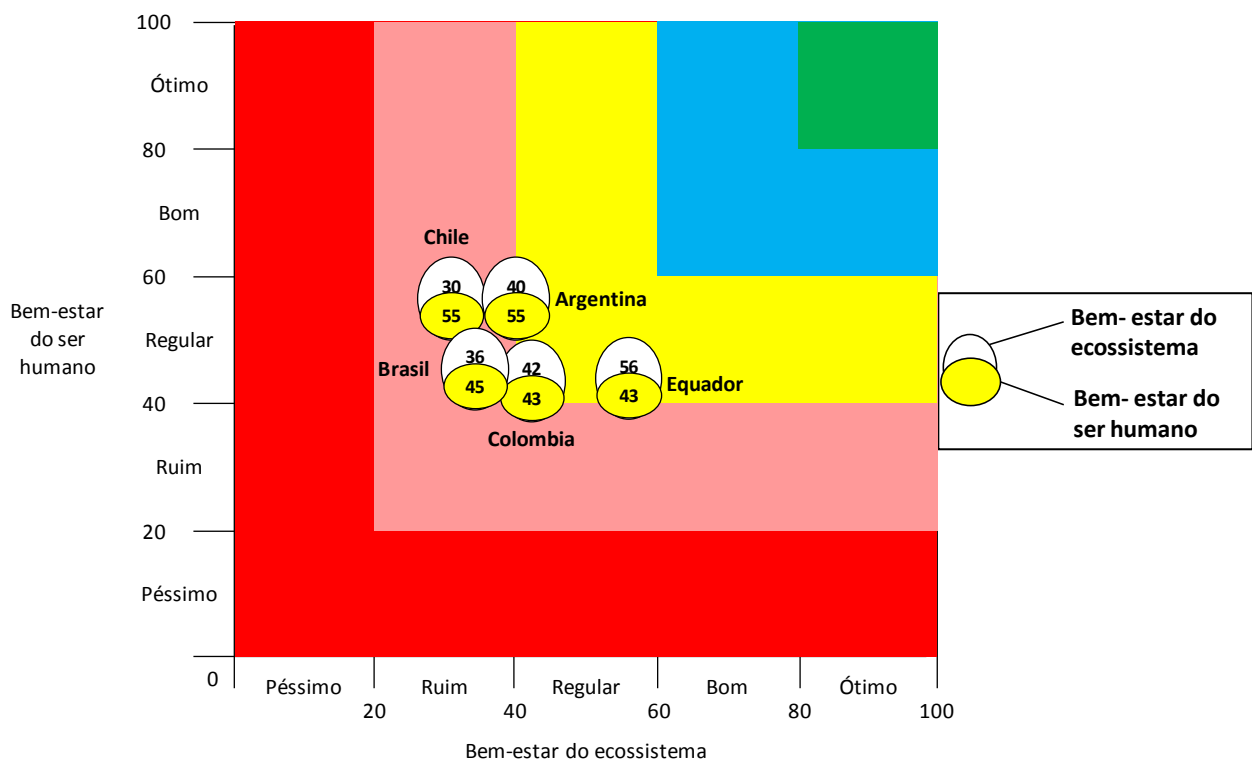


Figura 10 – Exemplo do método do Barômetro da sustentabilidade (adaptado de Prescott-Allen, 2001)

Prescott-Allen, um dos principais pesquisadores envolvidos no desenvolvimento deste método, afirma que uma de suas principais características é a capacidade de combinar indicadores, permitindo ao usuário chegar a conclusões a partir de muitos dados como a qualidade da água, emprego, criminalidade, educação (Prescott-Allen, 2001).

2.7. Discussão

Como ferramenta de modelagem, optou-se pelo CPN Tools. Os três *softwares* descritos anteriormente são capazes de modelar um SED arbitrário, no entanto, um melhor entendimento e a aparência podem ser atingidos pela RPC, principalmente em no caso do modelo apresentar diversos componentes similares (produtos e/ou processos). A possibilidade de programar funções no CPN Tools permite a construção de um modelo com lógica comparável a do sistema real, e a hierarquia

das transições, dividindo o sistema em blocos menores, facilita sua análise e modelagem. O uso dos monitores auxilia a obtenção dos dados necessários para a análise de desempenho e sustentabilidades propostas pelo trabalho.

Na análise do trabalho, utiliza-se o primeiro método da Pegada Ecológica, em função da maior facilidade de obtenção dos dados, por ser o mais popular dos métodos, além da regulamentação oferecida pelo *National Accounts Review Committee*, *Standards Committee* e *Global Footprint Network*.

3. Estudo de caso

Conforme levantamento no capítulo 2, uma cadeia de suprimentos pode ser analisada sob diferentes aspectos. Entretanto, considerando os conceitos de sustentabilidade em especial, observa-se que existem aspectos diretamente relacionados ao produto final: seu projeto, matérias primas, processos de fabricação envolvidos, funcionalidades desejadas, etc.

Por outro lado, existem outros aspectos que não estão diretamente relacionados com o produto final em si, mas que afetam significativamente a avaliação da sustentabilidade da cadeia de suprimentos como um todo. Dentre estes se destaca a parte do material e processos usados no empacotamento para o transporte e manuseio dos produtos.

Assim, o estudo de caso neste trabalho foca a etapa de empacotamento de produtos, pois independentemente do produto final, este é um fator que pode afetar efetivamente a sustentabilidade do sistema.

Devido à disponibilidade de dados de uma cadeia de suprimentos real, o estudo envolve a fabricação e distribuição de porcas de uma empresa localizada em Diadema, SP.

3.1. Formulação do problema

A cadeia de suprimentos considerada neste trabalho engloba os processos de pedidos de porcas pelos clientes, de pedidos e de entregas de matéria-prima, de fabricação de porcas e de transporte destas aos clientes da empresa fabricante.

A Figura 11 ilustra a visão geral da cadeia de suprimentos em estudo.

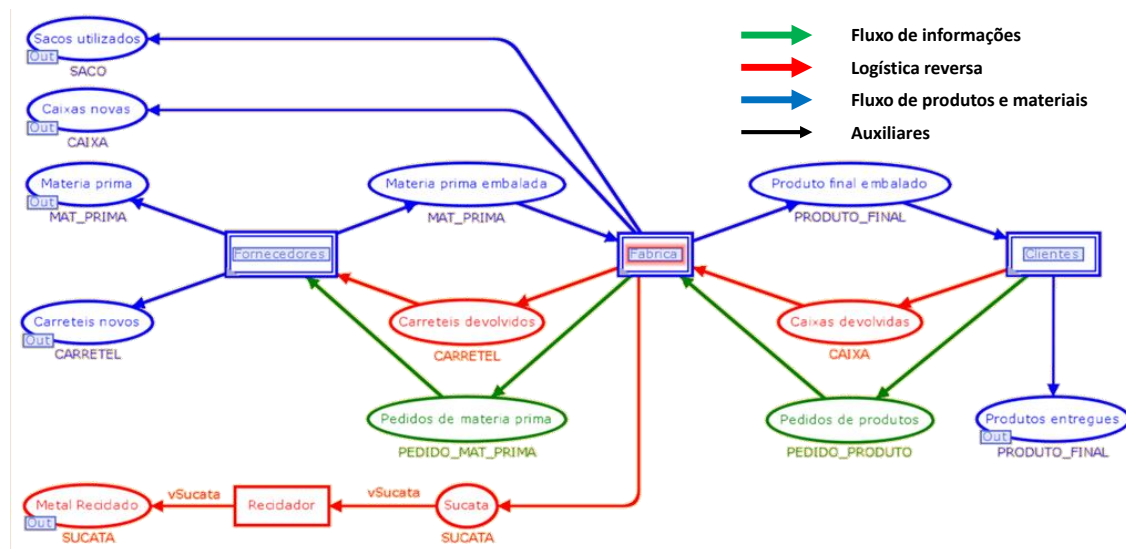


Figura 11 - Visão geral da cadeia de suprimentos

O aqui é verificar a viabilidade, nos aspectos de eficiência produtiva e de desenvolvimento sustentável, da troca dos sacos plásticos, atualmente utilizados para embalar e transportar produtos da fábrica aos seus clientes, por caixas plásticas reutilizáveis.

3.2. Definição dos objetivos e planejamento geral

Primeiramente é necessário o dimensionamento do número mínimo de caixas plásticas reutilizáveis suficientes para atender a demanda das porcas. Porém, tal demanda varia em função da necessidade dos clientes. Em cenários de demanda acima do limite máximo de produção de porcas da empresa, assume-se que o número de caixas plásticas necessárias também fica limitado à produção máxima.

Portanto, para comparar o cenário atual com o cenário proposto, é necessária a simulação do modelo da cadeia de suprimentos com diferentes situações de demanda de produtos, de forma a encontrar o limite máximo de produção de porcas que a empresa consegue produzir, em um determinado período.

Obtido o valor de capacidade máxima de produção da empresa, obtêm-se o número de caixas mínimo para atender as necessidades da empresa. Este número deve ser comparado coma quantidade de sacos plásticos utilizadas no cenário original, de acordo com os seguintes critérios:

- Custo médio das embalagens por lote de porcas produzidas, para mensurar a eficiência produtiva;
- Pegada Ecológica do material utilizado nas embalagens, para avaliar o nível de desenvolvimento sustentável em cada cenário.

3.3. Coleta de dados e descrição da cadeia de suprimentos

A cadeia de suprimentos foi dividida em 11 etapas principais:

- 1) Pedidos de clientes
- 2) Pedidos de matéria-prima
- 3) Entrada de matéria-prima
- 4) Estoque de matéria-prima
- 5) Stampagem
- 6) Limpeza após a stampagem
- 7) Rosqueamento
- 8) Limpeza após o rosqueamento
- 9) Inspeção
- 10) Embalagem
- 11) Transporte aos clientes

Nos subitens a seguir serão detalhados cada etapa:

3.3.1. Pedidos de clientes

Os pedidos dos clientes, contendo as especificações da porca e a quantidade de lotes, são feitos com no mínimo 30 dias de antecedência do prazo de entrega.

3.3.2. Pedidos de matéria-prima

A matéria-prima utilizada para a produção da maioria das porcas é o aço carbono. A empresa trabalha também com outras ligas, como o latão e o alumínio, mas em quantidades muito inferiores ao aço carbono. A matéria-prima é comprada em forma de bobinas e os pedidos precisam ser feitos aos fornecedores com três meses de antecedência do prazo de entrega estipulado. Há apenas duas empresas fornecedoras de matéria-prima e aproximadamente metade do total provém de cada uma.

3.3.3. Entrada de matéria-prima

A média mensal de entrada de matéria-prima na fábrica de porcas é de 90 toneladas. Os pedidos, assim como as entregas, são feitas semanalmente.

3.3.4. Estoque de matéria-prima

A matéria prima é depositada no estoque em forma de bobinas (Figura 12), organizada em função das especificações do material e do mês de ao depósito.



Figura 12 - Bobinas de aço carbono no estoque de matéria-prima

Após o consumo das bobinas de aço, sobram os carretéis. Estes ficam acumulados no estoque e são devolvidos para os fornecedores em um processo de logística reversa, aproveitando os caminhões que entregam as novas bobinas.

3.3.5. Estampagem

A primeira operação tecnológica pelo qual a matéria-prima passa é o de estampagem. Na estampagem, a matéria-prima é cortada em *blanks* de largura igual à largura da porca e então furada com as medidas necessárias para posterior usinagem do rosqueamento. A estampagem é feita através de máquinas e ferramentas (Figura 13) que funcionam com um *setup* definido, ou seja, o operador programa o formato, largura, tamanho do furo e outras características da porca para um determinado lote, e esta operação só é interrompida após o término da produção deste lote ou com o comando do operador responsável.



Figura 13 - Detalhe das ferramentas utilizadas na estampagem das porcas

A Figura 14 ilustra a bobina de aço carbono alimentando a máquina de estampagem. A Figura 15 ilustra um lote de *blanks* que após o processo de estampagem.



Figura 14 - Detalhe da matéria-prima entrando na estamparia



Figura 15 - *Blanks* resultantes da estampagem

3.3.6. Limpeza após a estampagem

O próximo passo da cadeia é o de limpeza dos *blanks*. Nesta etapa, ocorre a retirada do cavaco por meio de uma máquina vibratória e a lavagem para retirada do óleo e o restante dos cavacos.

3.3.7. Rosqueamento

Os *blanks* estampados então são levados para as rosqueadeiras que usinam as roscas. As rosqueadeiras existentes são do tipo manual, para lotes menores, ou do tipo automático, para quantidades maiores. Os operadores são responsáveis pela alimentação das rosqueadeiras e pelo *setup* das máquinas para o ajuste do tamanho do furo e do tamanho da porca.

3.3.8. Limpeza após o rosqueamento

As porcas passam novamente por uma limpeza (análogo ao item 3.4.6). Em seguida, o produto passa por uma centrífuga para a secagem.

3.3.9. Inspeção

Os operadores responsáveis pelo processo de inspeção examinam visualmente as porcas resultantes após a segunda lavagem. A etapa de inspeção complementa a conferência que os operadores dos realizam em suas respectivas etapas. As porcas são inspecionadas individualmente e os produtos defeituosos são segregados para eventual venda para um terceiro, especializado no derretimento e fabricação de ligas que servem de matéria-prima para outros processos produtivos. Os cabeçotes resultantes do furo feito na etapa de estampagem também têm a mesma destinação. Por mês, são rejeitadas nesta etapa, de 100 a 200 quilogramas de porcas.

3.3.10. Embalagem

Após a aprovação do lote na fase de inspeção, as porcas seguem para a etapa de embalagem e armazenamento no estoque de produto finalizado e pronto para ser transportado. A embalagem é realizada atualmente em sacos plásticos com identificação do lote.

A Figuras 16 abaixo ilustra as porcas embaladas com os sacos plásticos.



Figuras 16 e 19 - Porcas embaladas em saco plástico (esquerda) e caixas plásticas consideradas na proposta de troca (direita)

3.3.11. Transporte aos clientes

Depois de embaladas, as porcas são transportadas aos clientes através de dois caminhões da empresa. Mais de 90% das porcas vendidas é enviada para clientes localizados na Grande São Paulo.

3.4. Concepção do modelo

Algumas das premissas adotadas para a modelagem da cadeia de suprimentos são:

- A unidade do tempo simulado é o minuto;
- O tempo simulado só considera o período em que a fábrica está funcionando, ou seja, 5 dias por semana, 8,8 horas por dia. Foi considerado que a cada mês, a fábrica possui 21 dias de funcionamento;
- Foram considerados os 30 tipos de porcas mais solicitadas e produzidas pela fábrica analisada, e admitiu-se que estes representam toda a produção da fábrica (apesar do sistema real ter a capacidade de produzir mais de 200 tipos de porcas diferentes);
- A partir da estampagem, cada marca na RPC dentro do fluxo do produto representa um lote inteiro de um determinado tipo de porca;
- Para cada tipo de porca, o tamanho do lote e o diâmetro da bitola são inversamente proporcionais, de forma que todos os lotes inteiros de porcas têm 170 kg, independentemente do tipo;

As informações sobre tamanho de lote, diâmetro da bitola da porca e tipo de estampadeira e rosqueadeira são detalhadas na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Dados de cada tipo de porca

Tipo de Porca	Matéria prima (diâmetro da bitola)	Tamanho do lote (porcas)	Estampadeira	Rosqueadeira
1	22 mm	8.000	National G	San Shing
2	22 mm	8.000	National G	Manual
3	20 mm	12.000	KLP V	NUTAP Tipo 16
4	16 mm	30.000	National P	Manual
5	14 mm	40.000	KLP V	NUTAP Tipo 14
6	18 mm	20.000	KLP M	NUTAP Tipo 14
7	10 mm	80.000	KLP M	SUPER
8	10 mm	85.000	National M	SUPER
9	12 mm	79.000	National M	SUPER
10	10 mm	74.000	National M	SUPER
11	12 mm	69.000	National P	NUTAP Tipo 8
12	10 mm	64.000	National P	NUTAP Tipo 8
13	12 mm	59.000	National P	NUTAP Tipo 8
14	10 mm	54.000	National G	NUTAP Tipo 8
15	12 mm	49.000	National P	NUTAP Tipo 8
16	10 mm	45.000	National P	NUTAP Tipo 8
17	14 mm	41.000	National M	Fabricacao Propria
18	16 mm	37.000	KLP M	Fabricacao Propria
19	12 mm	33.000	National G	Fabricacao Propria
20	16 mm	29.000	National P	SUPER
21	14 mm	26.000	National P	Fabricacao Propria
22	18 mm	23.000	National M	NUTAP Tipo 16
23	20 mm	20.000	National P	NUTAP Tipo 16
24	22 mm	17.000	National G	NUTAP Tipo 16
25	18 mm	15.000	National G	NUTAP Tipo 16
26	20 mm	13.000	National G	NUTAP Tipo 16
27	22 mm	11.000	National G	San Shing
28	18 mm	9.000	KLP M	San Shing
29	20 mm	7.000	National G	Manual
30	22 mm	5.000	National G	San Shing

O CPN Tools possui uma função de extração de dados de um arquivo de texto exterior ao programa. Na simulação, esta funcionalidade foi utilizada para importar dados como os tempos de setup das máquinas ou o tipo de estampadeira, rosqueadeira, tamanho de lote padrão e o peso correspondente a cada tipo de porca.

Nas figuras dos subitens deste capítulo, as seguintes cores foram utilizadas para representar os diferentes tipos de fluxo dentro da rede de Petri colorida:

- Verde: representa os fluxos de informações (pedidos dos clientes ou pedidos de matéria-prima para o fornecedor);
- Vermelho: representa os fluxos de logística reversa (sucata, caixas plásticas e carretéis);
- Azul: representa os fluxos de matéria-prima, de produtos em fabricação ou finalizados e de insumos da cadeia de suprimentos (carretéis de matéria-prima, porcas em fabricação ou finalizadas, sacos e caixas plásticas);
- Preto: representa os fluxos auxiliares (contadores, tratamentos de informação e de cores, acesso as informações da base de dados externa).

Em seguida, as premissas e configuração de modelagem escolhidas para cada etapa da cadeia de suprimentos serão detalhadas:

3.4.1. Pedidos de clientes

Premissas e aproximações adotada para a etapa "pedidos de clientes":

- Para fazer a simulação de pedidos de porcas, considerou-se que os clientes fazem apenas um pedido de cada tipo de porca por mês;

A quantidade de porcas solicitada por pedido varia (usando a função *discrete* do CPN Tools, a qual retorna um valor aleatório e inteiro dentro do intervalo dos dois números inteiros de entrada) dentro de uma faixa de quantidade mínima e máxima por pedido para cada tipo de porca, de acordo com a Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Tamanho do lote e faixa de pedidos das porcas

Tipo de porca	Mínimo de pedidos (n° de porcas)	Máximo de pedidos (n° de porcas)	Modo de entrega
1	80.000	120.000	Diária
2	80.000	100.000	Diária
3	60.000	100.000	Diária
4	220.000	240.000	Única
5	1.000.000	2.600.000	Diária
6	870.000	1.170.000	Diária
7	300.000	400.000	Única
8	40.000	60.000	Única
9	56.000	84.000	Única
10	72.000	108.000	Única
11	96.000	144.000	Única
12	128.000	192.000	Única
13	168.000	252.000	Única
14	232.000	348.000	Semanal
15	400.000	600.000	Única
16	408.000	612.000	Semanal
17	712.000	1.068.000	Semanal
18	736.000	1.104.000	Semanal
19	984.000	1.476.000	Diária
20	896.000	1.344.000	Diária
21	616.000	924.000	Semanal
22	408.000	612.000	Semanal
23	304.000	456.000	Semanal
24	232.000	348.000	Semanal
25	168.000	252.000	Semanal
26	128.000	192.000	Semanal
27	96.000	144.000	Semanal
28	72.000	108.000	Diária
29	56.000	84.000	Diária
30	40.000	60.000	Semanal

O modo de entrega solicitado pelo cliente pode assumir três valores: entrega diária, semanal ou única. A entrega única será feita apenas na data final do prazo do pedido. A entrega semanal será feita semanalmente, começando em 10 dias após a solicitação do pedido e terminando no prazo final do pedido. A entrega diária será feita diariamente, também começando 10 dias após a solicitação do pedido.

Para simular a realização dos pedidos em dias diferentes, atribui-se aleatoriamente a cada marca da RPC, uma marcação de tempo entre um dia e vinte um dias úteis (completando um mês). Este processo é repetido a cada vez que o *clock* do simulador atinge o começo de um mês. Desta forma, cada marca só habilita a próxima transição quando o tempo de simulação atingir a marcação de tempo de cada pedido. A marcação de tempo representa o momento em que o pedido é efetivamente realizado.

A Figura 17 ilustra a etapa de geração de pedidos, onde se extrai os dados do lugar “Dados de pedidos” (Tabela 2) e aplica-se a função de aleatoriedade para os valores de quantidade de porcas e de tempo em que o pedido é feito.

No lugar “Pedidos de produtos”, encontram-se marcas com as seguintes informações: tipo de porca solicitada, antecedência ou prazo final de entrega em dias úteis, modo de entrega e quantidade de porcas, além da marcação de tempo, que representa o instante em que o pedido seria feito no sistema real.

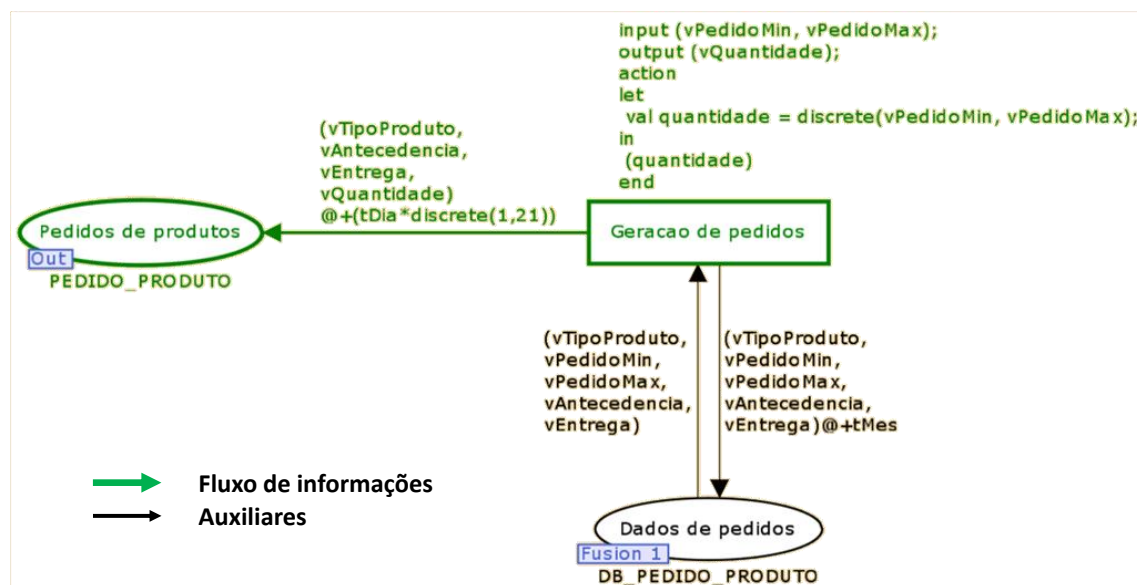


Figura 17 - Geração de pedidos

Como descrito anteriormente, dentro do processo de fabricação, cada marca da RPC representa no máximo um lote padrão inteiro de um determinado tipo de produto.

A Figura 18 ilustra a etapa de tratamento dos pedidos, para no final deste processo (lugar “Fila de ordens”) obter marcas da RPC com as informações de tipo de produto, tipo de matéria-prima, prazo (já tratado, conforme o modo de entrega solicitado pelo cliente) e proporção do lote padrão. A informação de proporção do lote é um número inteiro entre 1 e 100, que representa a porcentagem do lote inteiro exigido para aquela marca.

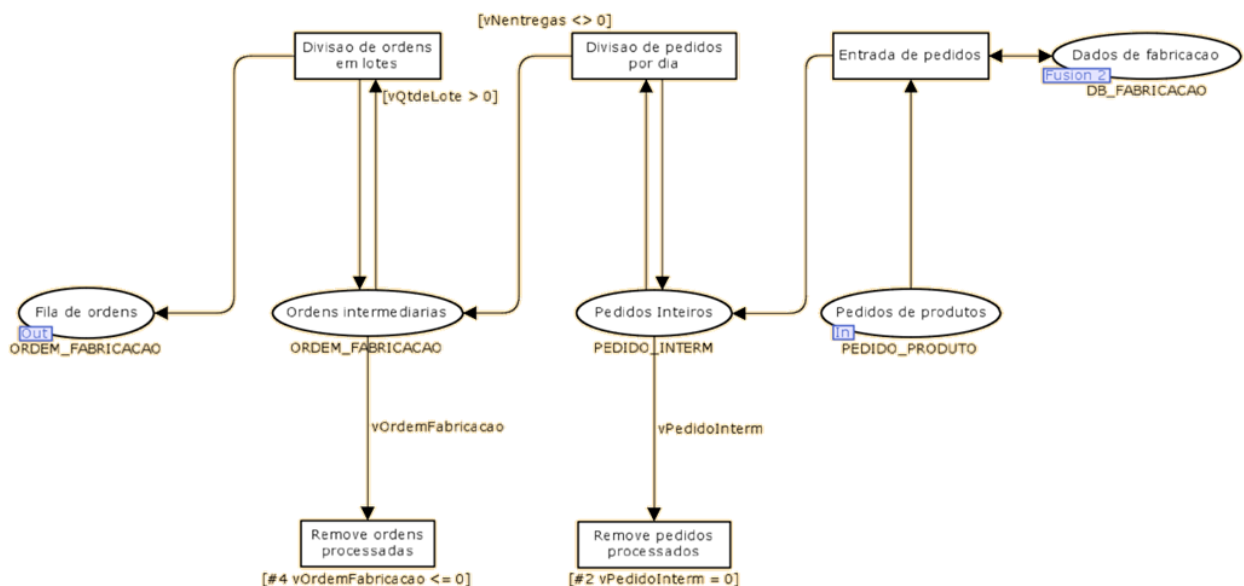


Figura 18 - Tratamentos dos pedidos

3.4.2. Pedidos de matéria-prima

As premissas e informações adotadas na etapa de "pedidos de matéria-prima" são:

- Para representar os diferentes de diâmetro das bobinas de matéria-prima, adotam-se no modelo sete tipos de matéria-prima diferentes (listados na Tabela 1);
- Os pedidos de matéria-prima são feitos em números de carretéis. Cada carretel contém 1700 kg de matéria-prima.
- A verificação do estoque e dos pedidos feitos de matéria-prima é realizada uma vez por semana;
- O estoque ideal (somando o estoque atual com os pedidos já realizados) que a cadeia trabalha é suficiente para atender o período de quatro meses de produção;
- Os pedidos são feitos com três meses de antecedência da data de entrega;
- A empresa trabalha, de fato, com dois fornecedores, mas para efeito de simplificação, considerou-se um único fornecedor;
- Adotou-se uma vida útil de 10 viagens para os carretéis no modelo.

O processo de emissão de pedidos é modelado pela RPC indicada na Figura 19. A cada semana, há uma comparação entre o valor do estoque ideal e do estoque atual mais os pedidos já encaminhados. Se esta soma é menor que o valor do estoque ideal, uma transição envia um pedido para a fila de pedidos.

No começo da simulação, foram alocadas marcas iniciais no estoque de matéria-prima e na fila de pedidos, de forma que o estoque inicial somado com os pedidos já introduzidas no modelo corresponda ao estoque ideal calculado.

Os pedidos de matéria-prima funcionam de forma semelhante aos pedidos dos clientes. Ambos possuem uma marcação de tempo, a qual representa o momento em que elas ocorrem no sistema real. Os pedidos foram modelados de forma que, após o tempo de 3 meses do envio dos pedidos a fila, estes são atendidas pelo fornecedor e a matéria-prima chega ao estoque.

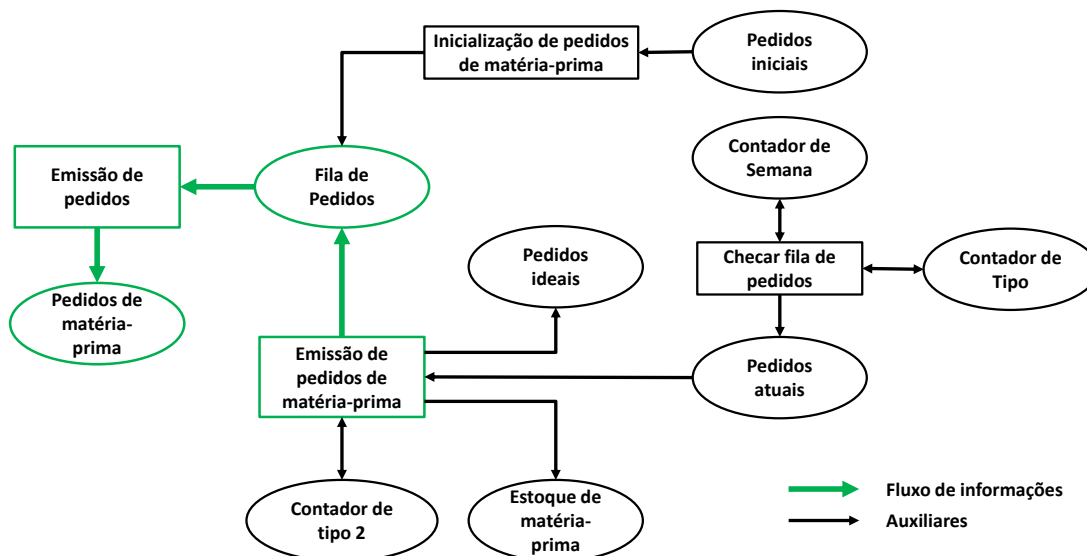


Figura 19 - Processo de emissão de pedidos de matéria-prima

3.4.3. Entrada de matéria-prima

A Figura 20 apresenta o modelo que descreve como é feita a contagem de matéria-prima enviada pelo fornecedor e de carretéis utilizados. Se não há um carretel vazio disponível na cadeia, um novo carretel é inserido. Em seguida, a matéria-prima embalada é enviada para o estoque de matéria-prima.

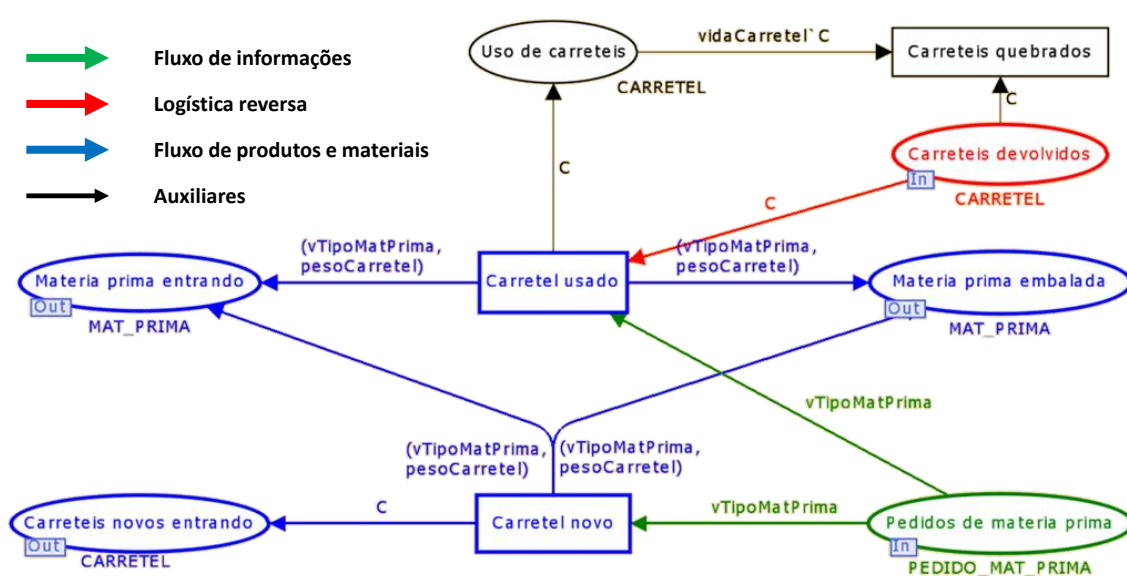


Figura 20 - Pedidos e entregas de matéria-prima

3.4.4. Estoque de matéria-prima

Os pedidos dos clientes são encaminhados, para o *buffer* de estampagem. À medida que cada pedido passa pela transição da RPC (Figura 21) que os leva para a estampagem, eles consomem uma parte do estoque de matéria-prima.

A quantidade de porcas e o peso por porca em um lote padrão são inversamente proporcionais, de forma que, independente do tipo de porca, o lote padrão inteiro, o peso de 170 kg. Quando um lote padrão inteiro é enviado à fila de ordens, este consome 170 kg do carretel, que possui no máximo 1700 kg. Se o carretel no estoque possui menos matéria-prima do que o pedido irá consumir, o pedido é dividido em partes de forma que um carretel é consumido por uma parte, e a parte restante consome a matéria-prima de um novo carretel. Os carretéis totalmente consumidos são enviados para o fornecedor, utilizando a logística reversa, e encaminhados ao *buffer* de carretéis devolvidos da Figura 20.

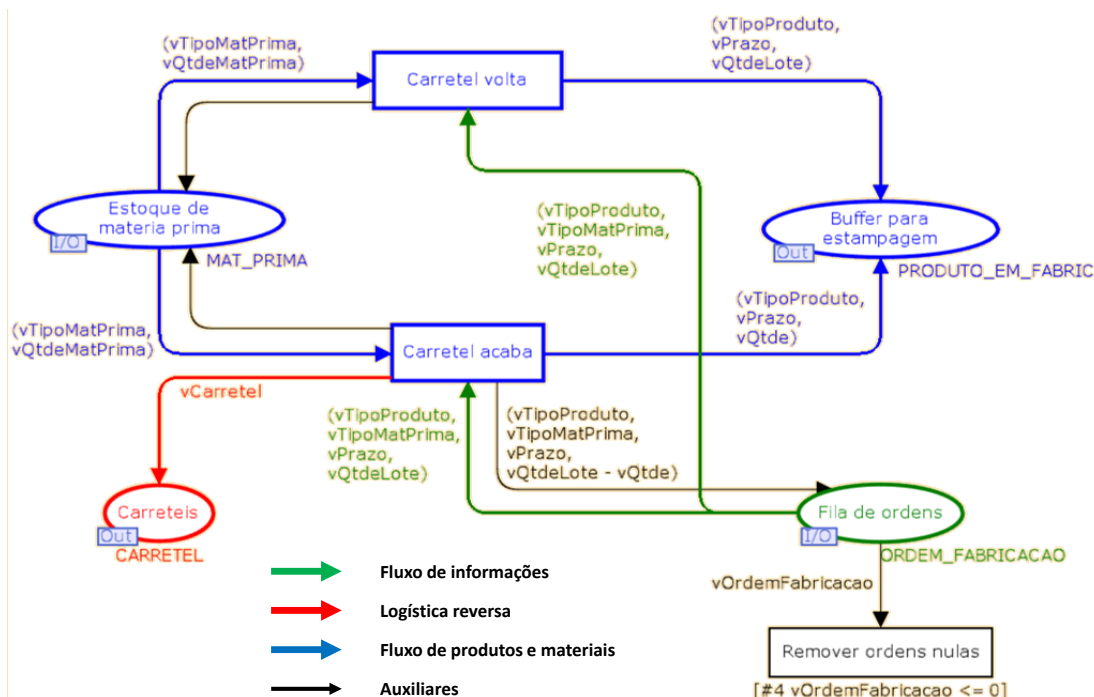


Figura 21 - Fila de pedidos dos clientes indo para o *buffer* de estampagem

3.4.5. Estampagem

A operação de estampagem inicia com a alocação dos lotes do *buffer* de estampagem geral para os *buffers* de cada tipo de estamparia. A Tabela 3 apresenta as informações sobre as estamparias consideradas no modelo.

Tabela 3 - Informações das estamparias consideradas

Tipo de estampadeira	Nome	Quantidade	Tempo de operação (min)	Tempo de setup (min)
1	National P	2	108	120
2	National M	2	340	200
3	National G	3	152	135
4	KLP V	3	454	240
5	KLP M	2	180	145

Algumas das premissas adotadas no modelo para as estamparias são:

- O tempo de *setup* é ativado apenas quando uma estamparia termina de produzir um tipo de porca e passa a produzir outro diferente;
- A prioridade para a estampagem é dada para o tipo de porca que possui o prazo de entrega mais curto;
- A cada lote inteiro processado, as estamparias produzem 16 kg de sucata, pois aproximadamente 9,4% do peso do material são perdidos nesta etapa;
- Para modelar a manutenção das máquinas, foi estimada uma chance de 10% das máquinas precisarem de um tempo adicional para manutenção, equivalente ao tempo de operação de cada estamparia, a cada vez que um lote entra para ser estampado.
- Cada tipo de porca está associado a apenas um tipo de estamparia.

A Figura 22 apresenta a separação do *buffer* em cinco tipos, um para cada estamparia e os ordena em função do prazo de cada marca da RPC contida no *buffer*. A operação de estampagem está representada na Figura 23.

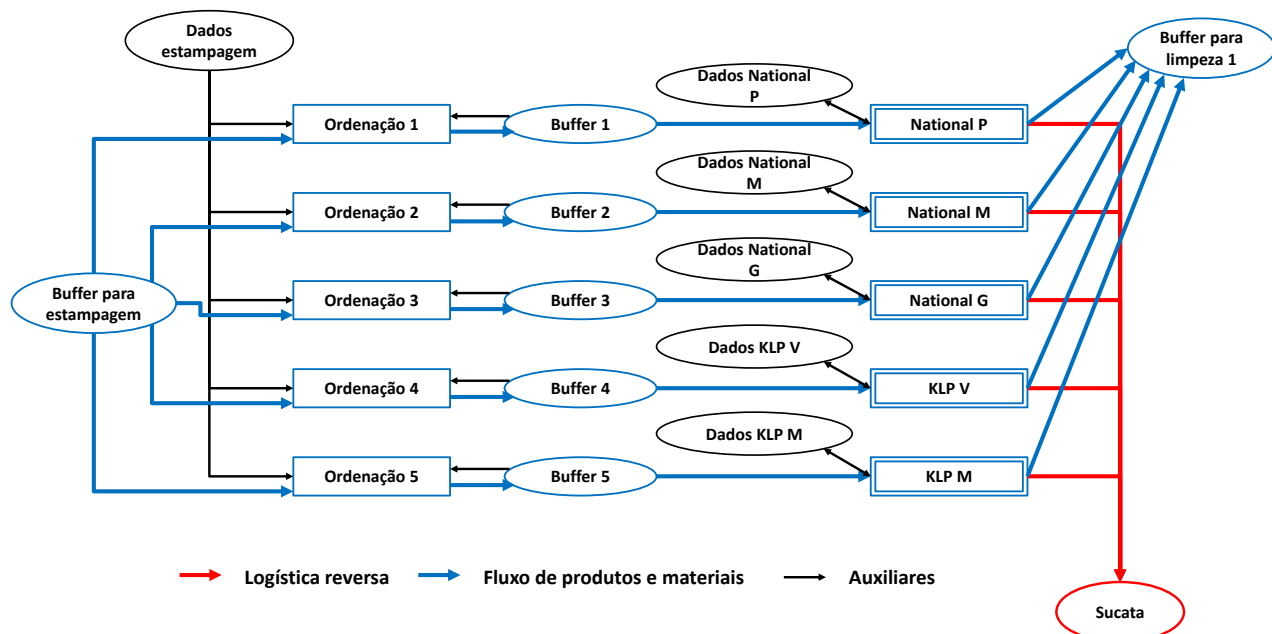


Figura 22 – Preparação para a estampagem

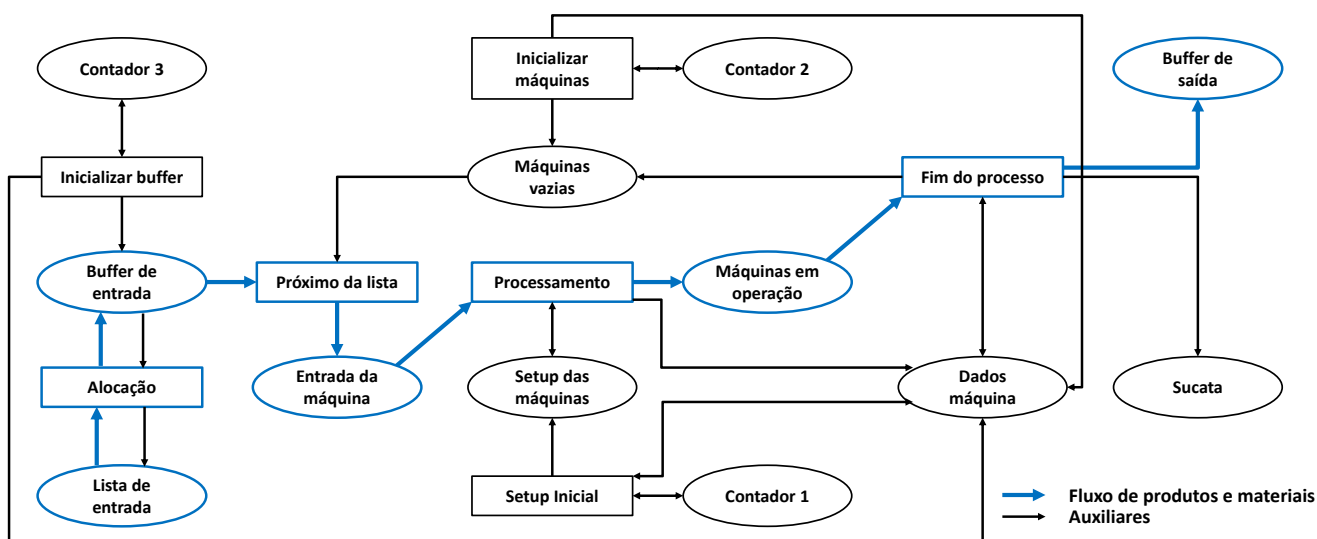


Figura 23 - Estampagem

A RPC que representa o processo de estampagem é relativamente extensa, pois nela são necessárias às informações do número de máquinas vazias, tipo de produto anterior (para verificar se a máquina precisa de um novo *setup* ou não) e um algoritmo que envia apenas um conjunto de lotes (o total de marcas enviadas é uma variável que pode ser alterada) do mesmo tipo de cada vez, para as estamparias. Este algoritmo é utilizado para definir se a cadeia deve priorizar os prazos das marcas ou

seus tipos, para reduzir os tempos de *setup* enviando várias marcas de um mesmo tipo em sequência.

3.4.6. Limpeza após a estampagem

A limpeza das peças após a estampagem (Figura 24) é modelada de forma que todas as peças passem pelo processo. Na cadeia de suprimentos real, nem sempre todas as peças passam por esta limpeza, mas para simplificar o modelo, adota-se que todo lote precisa passar por esta etapa, mas o tempo de espera na etapa foi reduzido em 25%, para compensar as porcas do sistema real que passam direto para o rosqueamento. Esta etapa utiliza a priorização por prazo, sendo que um lugar na RPC que ordena os lotes do *buffer* em função do prazo se faz necessário.

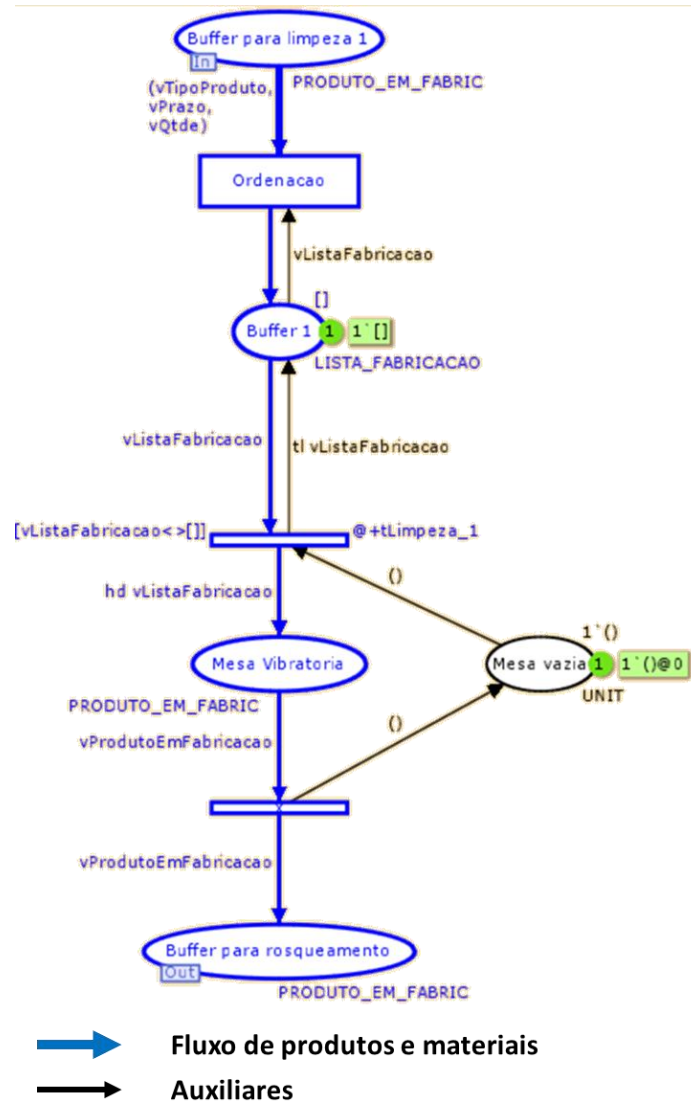


Figura 24 - Processo de limpeza após a estampagem

3.4.7. Rosqueamento

A operação de rosqueamento ocorre de forma similar à estampagem. O *buffer* para rosqueamento ordena e separa os lotes em *buffers* específicos para cada tipo de máquina (Figura 25), e então o lote de porcas é encaminhado para as rosqueadeiras.

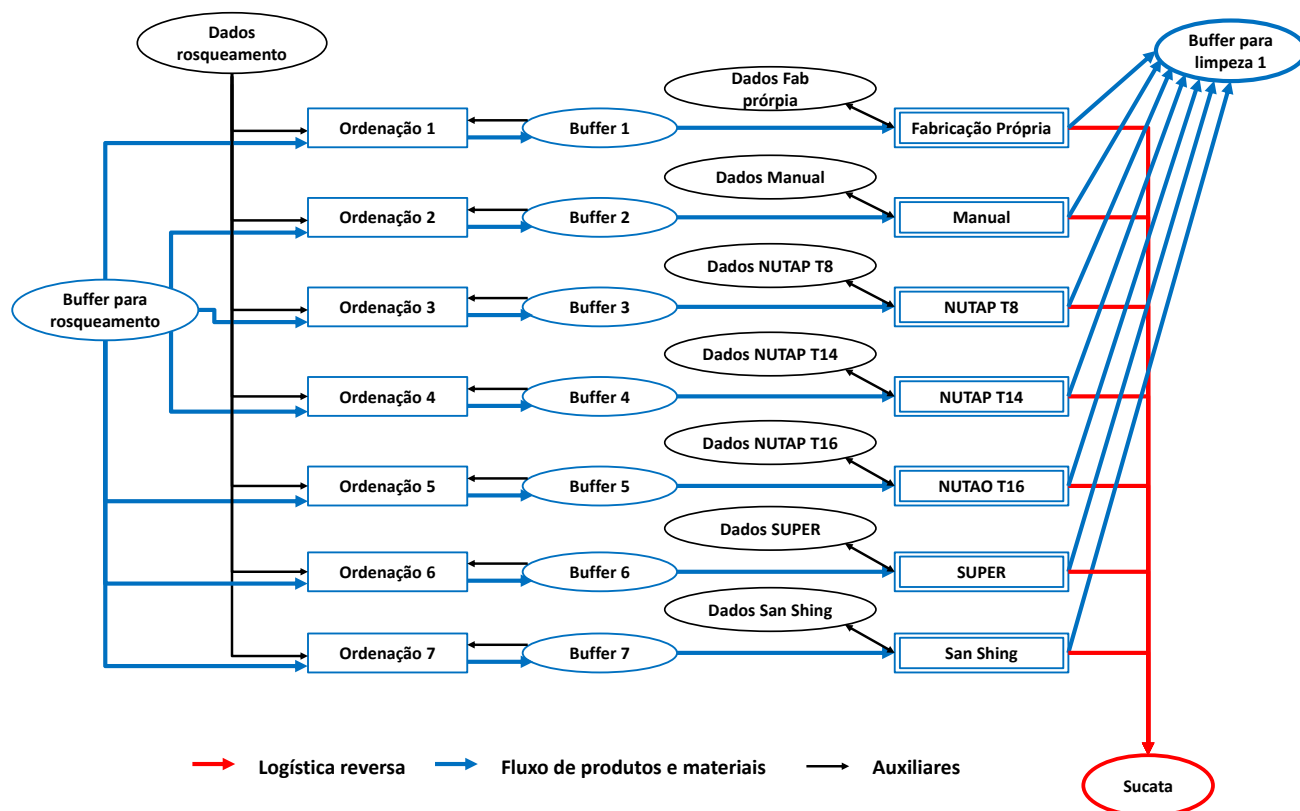


Figura 25 - Preparação para o rosqueamento

As informações das rosqueadeiras encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4- Informações das rosqueadeiras

Tipo de rosqueadeira	Nome	Quantidade	Tempo de processamento (min)	Tempo de setup (min)
1	Fabricação Própria	14	1050	120
2	Manual	7	1000	117
3	NUTAP Tipo 8	3	330	72
4	NUTAP Tipo 14	5	305	70
5	NUTAP Tipo 16	4	150	60
6	SUPER	5	320	71
7	San Shing	3	500	83

A modelagem do rosqueamento das porcas é similar ao realizado para a estampagem, com exatamente a mesma estrutura de rede de Petri da Figura 23, mas com a alimentação dos dados das rosqueadeiras. As premissas de tempo de *setup*, manutenção e prioridade da estampagem também foram revistas para o rosqueamento. Quanto à premissa da sucata, estimou-se que a cada lote padrão inteiro, 12 kg são perdidos no rosqueamento, sob a forma de cavaco.

3.4.8. Limpeza após o rosqueamento

Na limpeza após o rosqueamento, foi inserida a máquina de lavagem e a centrífuga, com a mesma premissa da limpeza após a estampagem, de que todos os lotes passam por esta operação, mas em um tempo menor do que o sistema real.

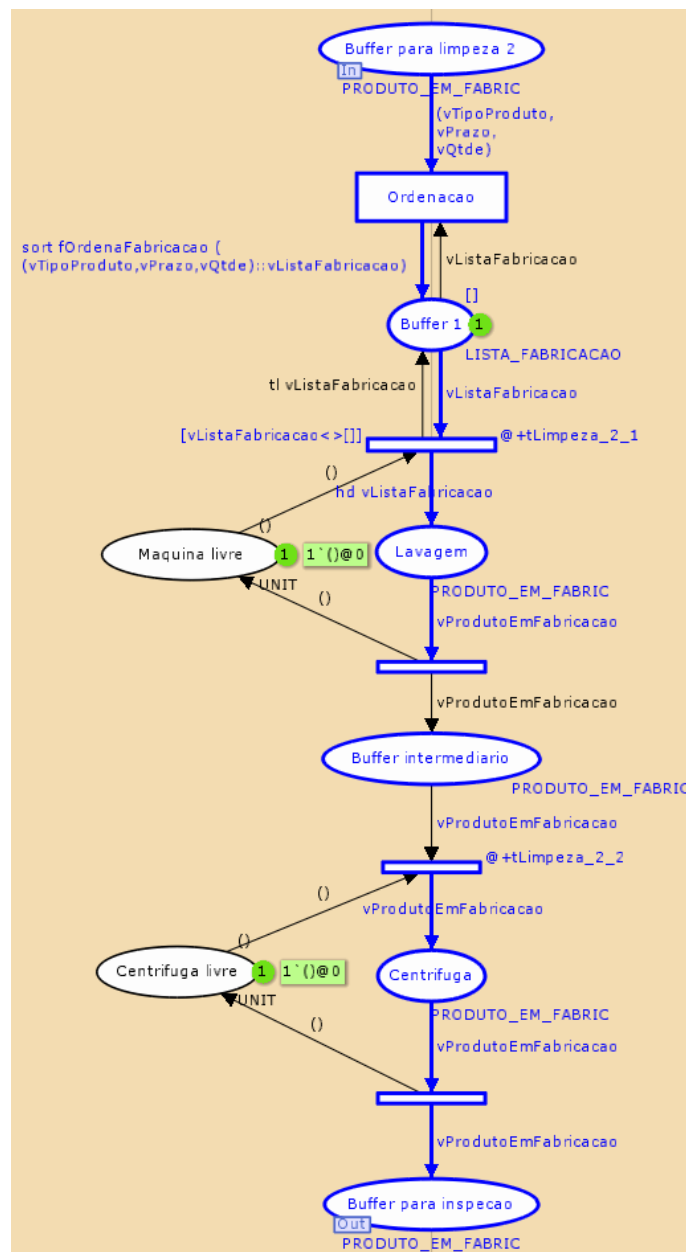


Figura 26 - Limpeza após o rosqueamento

A Figura 26 apresenta o modelo da operação de limpeza após o rosqueamento. Assim como a limpeza após a estampagem, a prioridade na ordem de limpeza é do lote que tem o menor prazo de entrega.

3.4.9. Inspeção

A etapa de inspeção conta com nove funcionários e o tempo de inspeção depende do tipo de porca verificado. A Figura 27 apresenta o modelo da etapa de inspeção, com a extração dos tempos de inspeção para cada tipo de porca do banco de dados. Para simular os lotes que não foram aprovados, adota-se uma chance de 0,22% de o lote ser reprovado na inspeção e enviado para reciclagem, baseado em informações coletadas de que a cada 90 toneladas de matéria-prima, 200 kg são recolhidos de sucata nesta etapa.

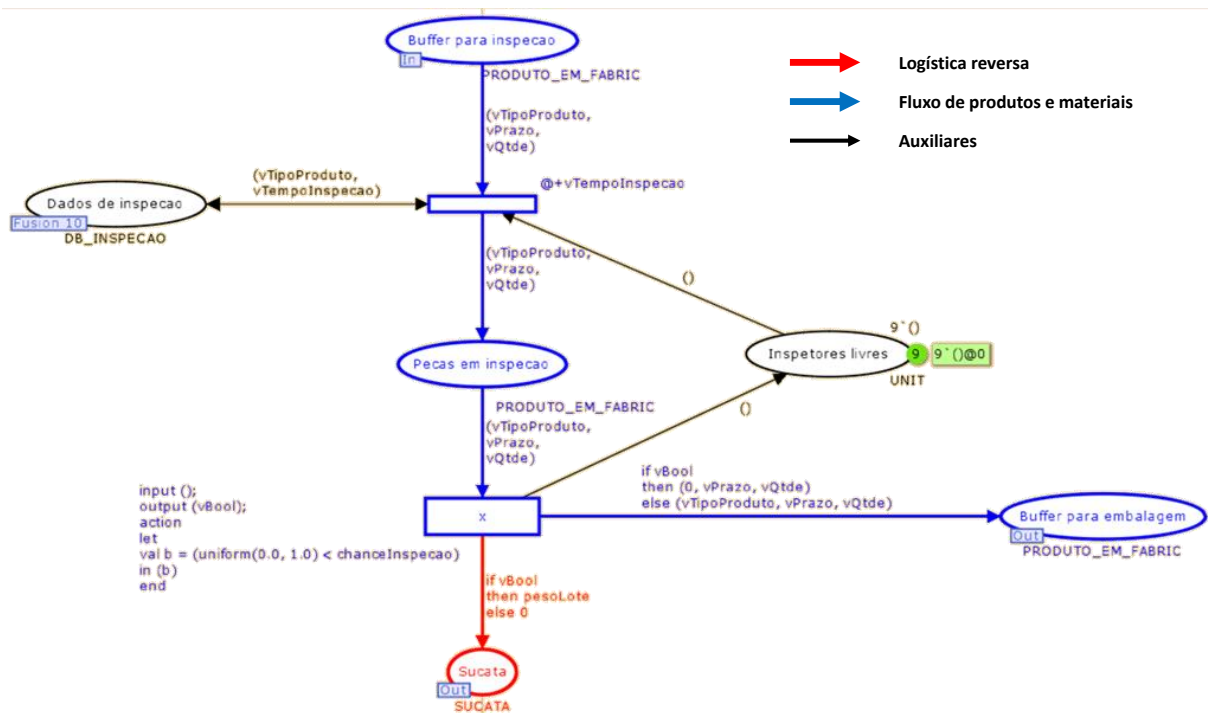


Figura 27 - Inspeção das porcas

3.4.10. Embalagem

A etapa de embalagem é modelada com um *switch*, o qual permite a escolha do modo como as porcas são embaladas, isto é, com os sacos plásticos (cenário atual) ou com caixas plásticas retornáveis (cenário proposto). No modelo são inseridos contadores de sacos plásticos e de caixas retornáveis, e as premissas adotadas são:

- Ou as porcas são embaladas apenas por sacos plásticos, ou são embaladas apenas por caixas plásticas;
- Há dois embaladores trabalhando neste processo da cadeia, de forma que cada um embala apenas um lote por vez;
- O tempo de embalagem com os sacos é de 12 minutos e o tempo de embalagem com as caixas é de 17 minutos, independentemente do tipo de porca;
- Cada tipo de porca diferente demanda um número diferente de caixas ou sacos para embalar seus lotes;
- O número de porcas que cabe em uma caixa corresponde a 1,4 vezes o número de porcas que cabe em um saco plástico;
- As caixas retornam para a cadeia dois dias após a entrega do pedido aos clientes, pois a maioria dos clientes está localizada a apenas um dia de viagem;
- As caixas possuem vida útil de 100 entregas.

A Figura 28 apresenta o modelo da etapa de embalagem das porcas. Da mesma forma que as etapas anteriores, os lotes que chegam do *buffer* de embalagem são ordenados com prioridade para o menor prazo de entrega.

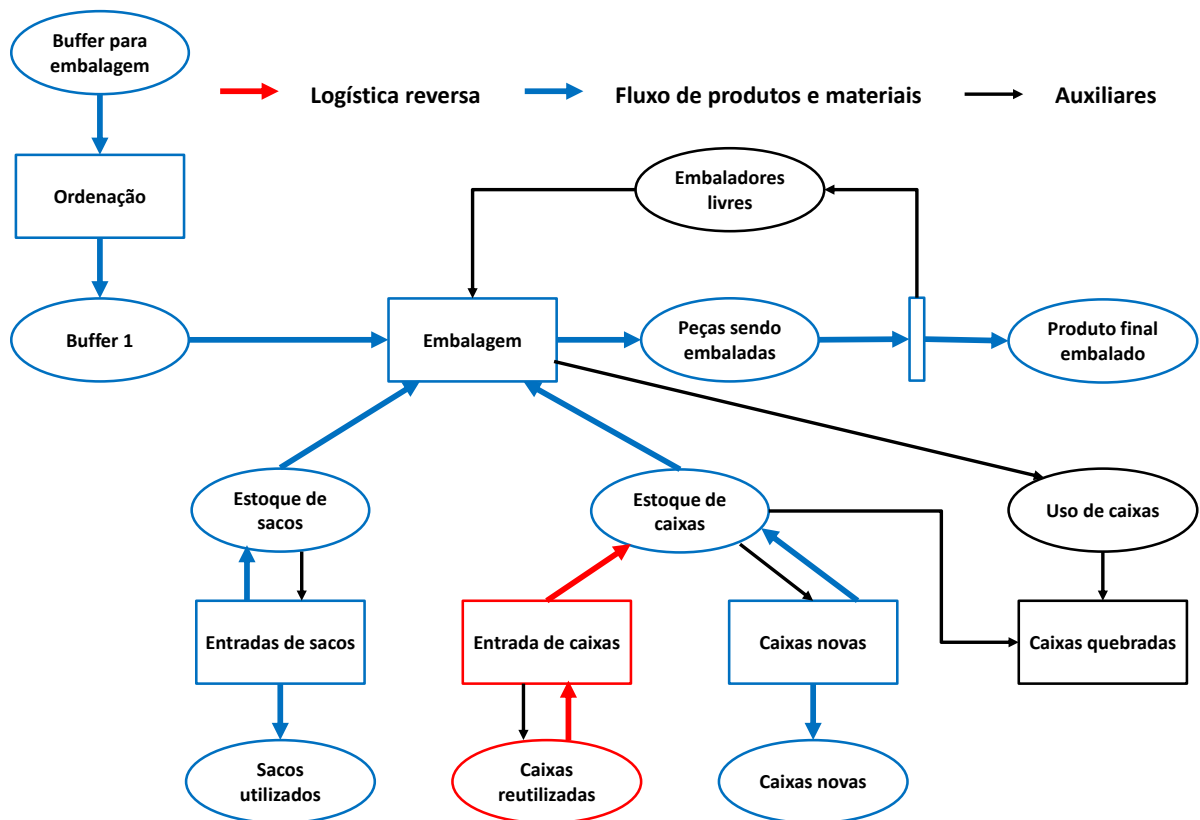


Figura 28 - Embalagem das porcas

3.4.11. Transporte aos clientes

A etapa final da cadeia de suprimentos é a entrega dos pedidos aos clientes, e o retorno das caixas, se estas foram utilizadas, em um fluxo de logística reversa. A Figura 29 representa a forma como esta etapa é modelada.

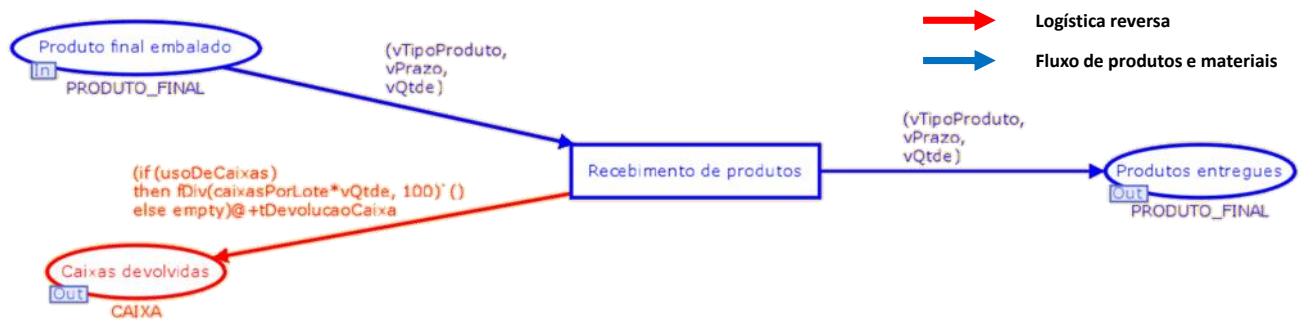


Figura 29 - Entrega do pedido aos clientes e devolução das caixas

3.5. Verificação do modelo

Para a verificação do modelo, a simulação foi realizada com o acompanhamento de monitores, ferramentas de inspeção do CPN Tools, em cada etapa da cadeia, de forma que após certo período de simulação, é possível extrair informações como o número de marcas que passou por determinado lugar ou o número de vezes que uma transição foi habilitada/disparada.

Nesta etapa, foi possível verificar os pontos onde havia erros na habilitação de transições e em lugares que acumulavam um número de marcas maior que o esperado.

Após a correção dos erros encontrados, a simulação de alguns lotes de porcas foi acompanhada do começo ao fim da cadeia, para assegurar que todas as etapas do modelo se comportavam de forma adequada, isto é, de acordo com os dados disponíveis do sistema real.

3.6. Validação do modelo

Para assegurar a validação do modelo, foram estabelecidos limites mínimos e máximos para a operação da fábrica. Esses limites foram estabelecidos com base nas operações normais da fábrica real considerada:

Tabela 5 - Critérios de validação

		Mínimo	Máximo
Estampa- deiras	Sucata por mês (t)	11,1	15,0
	Matéria prima por mês (t)	72,0	108,0
	Pedido mensal (porcas)	10,6	14,4
	Produção mensal (porcas)	10,6	14,4
	Tempo em processamento	55,0%	85,0%
	Tempo em setup	3,0%	11,0%
	Tempo em manutenção	5,0%	9,0%
	Tempo em vazio	5,0%	35,0%

Como critério de validação, os limites não devem ser ultrapassados em mais que 5% dos meses. Validou-se o modelo com o resultado agregado de 10 testes, isto é, simulações de 10 meses de funcionamento da fábrica.

Para evitar eventuais efeitos de inicialização do modelo, foram utilizados dados resultantes depois de dois meses de funcionamento antes do início coleta de dados. Essa técnica de inicialização foi usada em todas as simulações feitas nesse trabalho.

Nas figuras Figura 30Figura 31Figura 32 e Figura 33, apresentam-se os resultados de uma simulação:

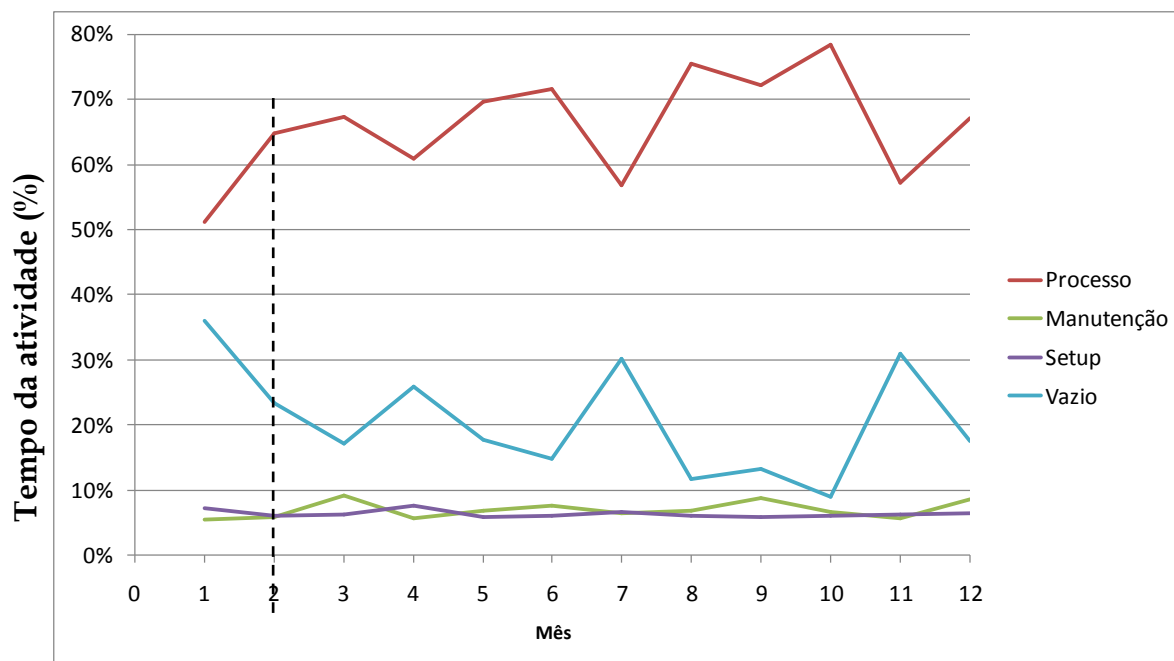


Figura 30 - Taxas de utilização das estampadeiras

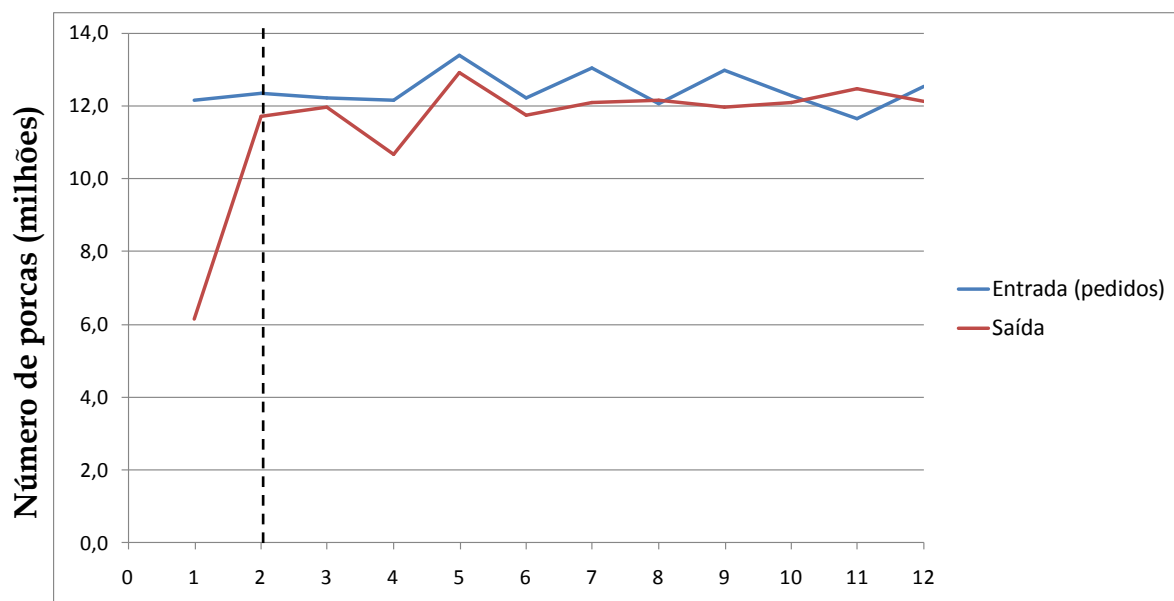


Figura 31 - Entrada de pedidos e saídas de produtos

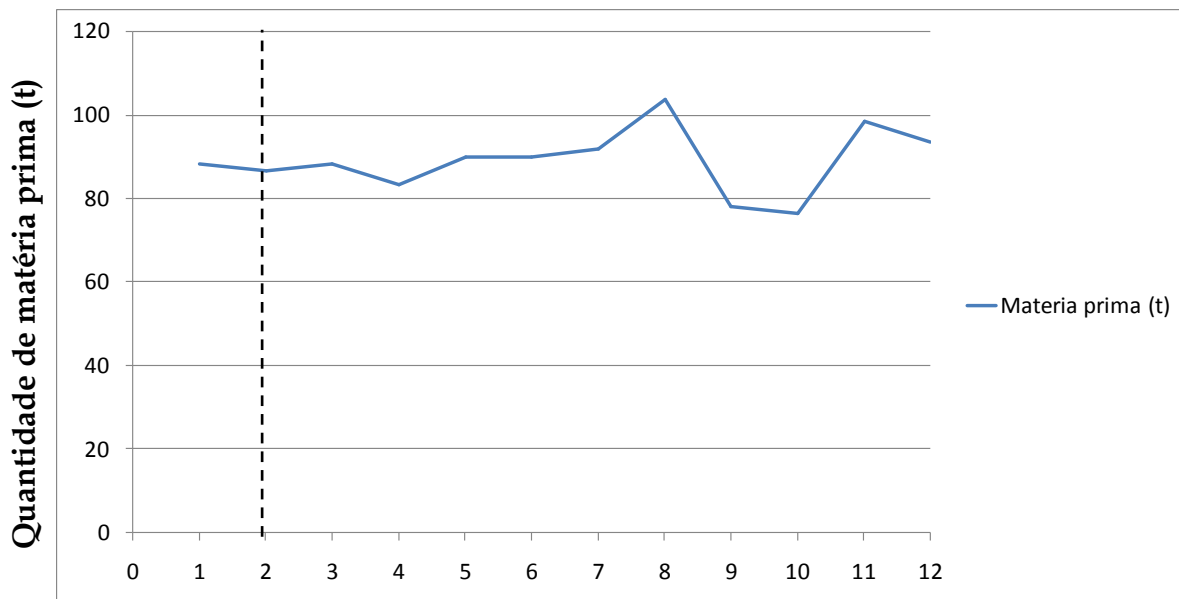


Figura 32 - Matéria prima entrando na fábrica

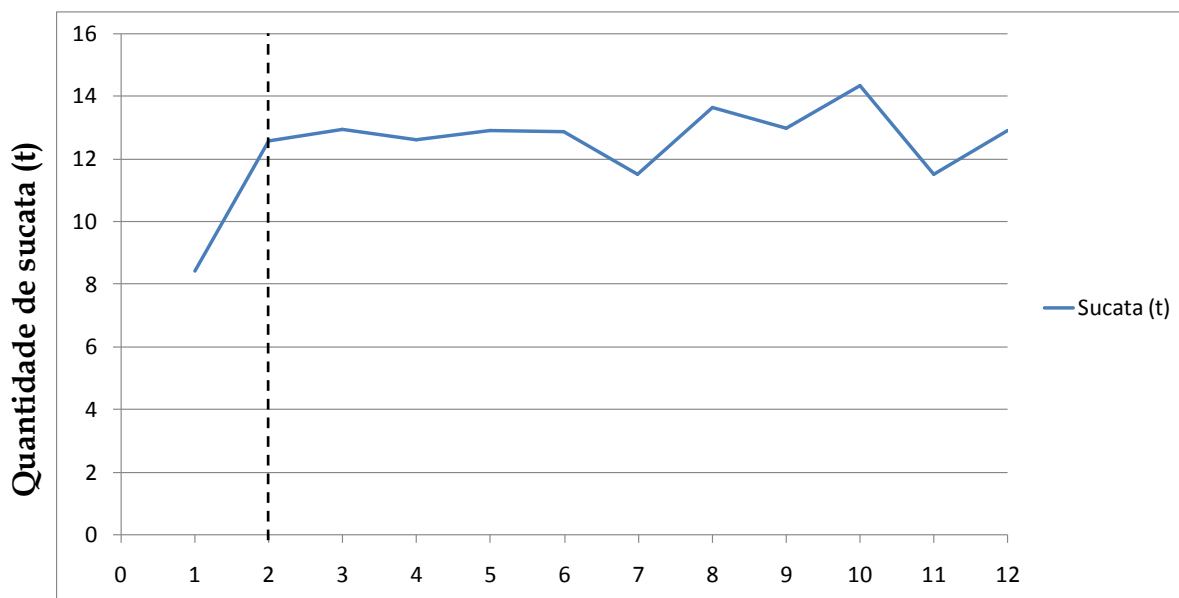


Figura 33 - Aço saindo na fábrica como sucata

3.7. Projeto do experimento

Para o experimento visando a análise do sistema, o modelo é executado para dois cenários distintos: um com a fábrica funcionando com o setor de embalagens usando sacos, e outro com a utilização de caixas plásticas retornáveis. Em cada cenário, são feitos 7 grupos de 10 simulações, com cada grupo de simulações com um valor de demanda total diferente.

Como mencionado anteriormente, cada simulação é realizada com base nos resultados obtidos após 2 meses simulados de inicialização, e com 10 meses de coleta de dados em seguida. Para cada simulação, são coletados dados de número de embalagens utilizadas (número total de sacos e número de caixas disponíveis médias + caixas quebradas).

Na Tabela 6 e na Figura 34, é apresentada uma parte dos dados de uma simulação para o funcionamento com caixas, tabeladas com auxílio de um editor de planilhas.

Tabela 6 - Dados brutos de uma simulação (sobre as caixas utilizadas para embalagem de porcas)

Novas	Retornando	Estoque	Quebradas	Tempo	Step
100	0	100	0	0	26
200	0	200	0	0	98
200	0	171	0	1992	996
200	29	142	0	2014	1009
200	58	139	0	2036	1021
200	61	138	0	2058	1038
200	62	109	0	2100	1068
200	91	90	0	2243	1310
300	91	190	0	2255	1312
300	91	189	1	2255	1314
300	110	175	1	2265	1325
300	124	146	1	2344	1351
300	153	135	1	2366	1363
300	164	108	1	2555	1418
300	191	79	1	2674	1521
400	191	179	1	2686	1522
400	191	178	2	2686	1523
400	220	149	2	2696	1529
400	249	131	2	2818	1569
400	267	102	2	2900	1588
2500	793	641	1047	132781	135638
2500	793	640	1048	132793	135641
2500	812	640	1048	132793	135650
2500	812	611	1048	132793	135658
2500	841	582	1048	132837	135697
2500	791	632	1048	132845	135709
2500	791	632	1048	132849	135711
2500	820	615	1048	132859	135724
2500	770	665	1048	132865	135727
2500	787	636	1048	132871	135738
2500	787	636	1048	132883	135752
2500	787	635	1049	132883	135753
2500	816	606	1049	132955	135780
2500	795	656	1049	132978	135792
2500	795	643	1049	133024	135830
2500	795	643	1049	133036	135839
2500	758	693	1049	133050	135842
Fim	---	---	---	133056	135849

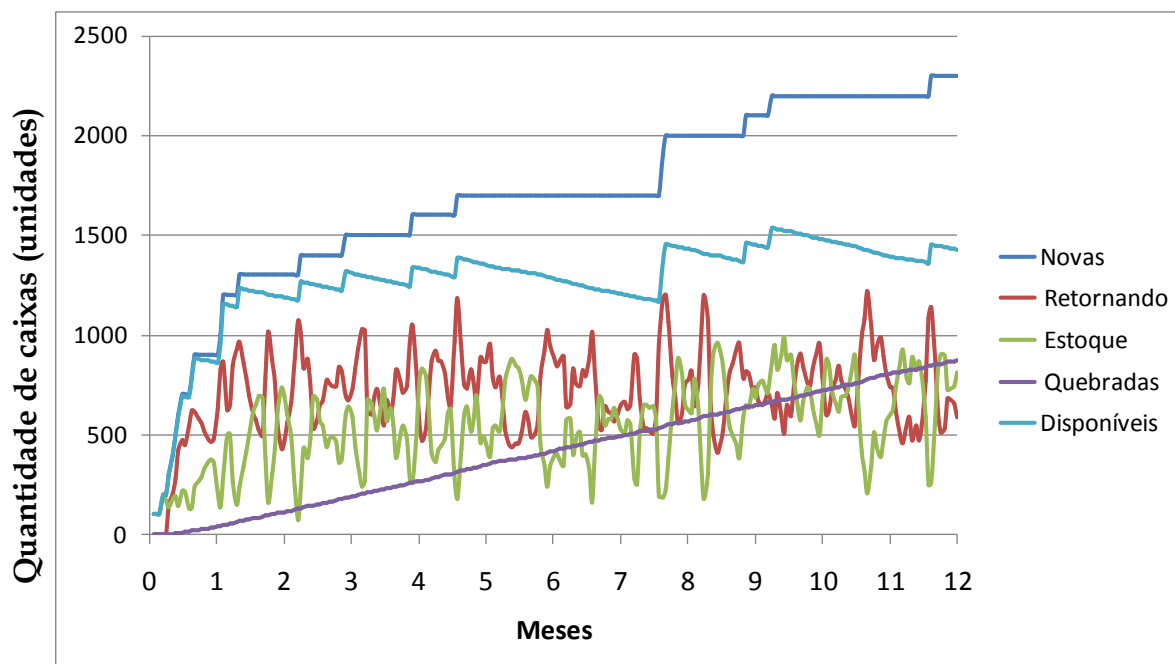


Figura 34 - Gráfico com os dados de uma simulação

3.8. Execução do modelo e análise

A execução do modelo resultante da composição das RPC das etapas da cadeia de suprimentos com os parâmetros e cenários descritos no item anterior foi conduzida com o CPN Tools. Foram obtidos os dados necessários para o cálculo dos índices de custo de embalagem por lote de porcas e da Pegada Ecológica.

Os resultados obtidos com a execução das simulações encontram-se na Tabela 7. Estes representam a quantidade de caixas necessárias, de caixas quebradas e de sacos plásticos necessários para cada cenário de demanda anual.

Tabela 7 - Resultados das simulações

Demanda (em milhões)	9	10	11	12	13	14	15	16
Caixas necessárias	3903	3993	4051	4136	4218	4167	4199	4165
Caixas quebradas	926	1024	1123	1205	1255	1256	1262	1270
Sacos (em milhares)	139	152	165	177	186	188	192	194

O número de caixas necessárias representa a quantidade mínima de caixas para a execução da operação de embalagem das porcas. No caso do primeiro ano do uso de caixas, para uma demanda anual de 9 milhões de porcas, por exemplo, seria necessária a compra de 3903 caixas mais a reposição de 926 caixas quebradas, resultando em uma necessidade de 4829 caixas no primeiro ano, para este cenário. Para o segundo ano da operação com caixas, no entanto, só seria necessário repor as caixas que foram quebradas, resultando em uma necessidade de apenas 926 caixas no segundo ano, para o mesmo cenário de demanda.

As figuras Figura 35, Figura 36 e Figura 37 representam os resultados em formato de gráfico:

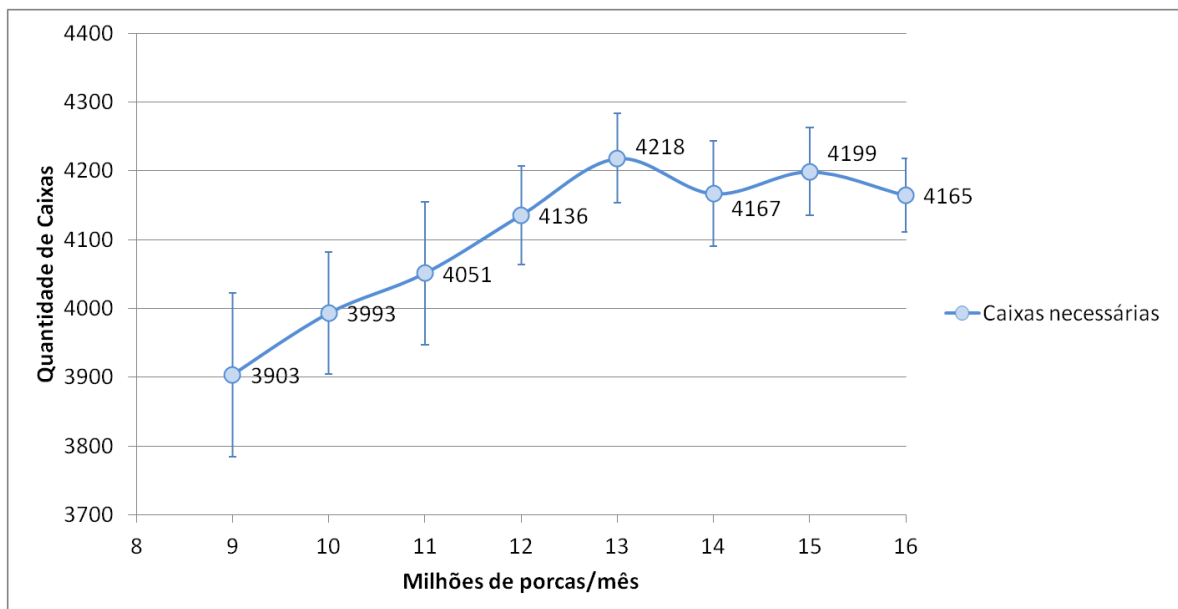


Figura 35 - Caixas necessárias por demanda anual de porcas

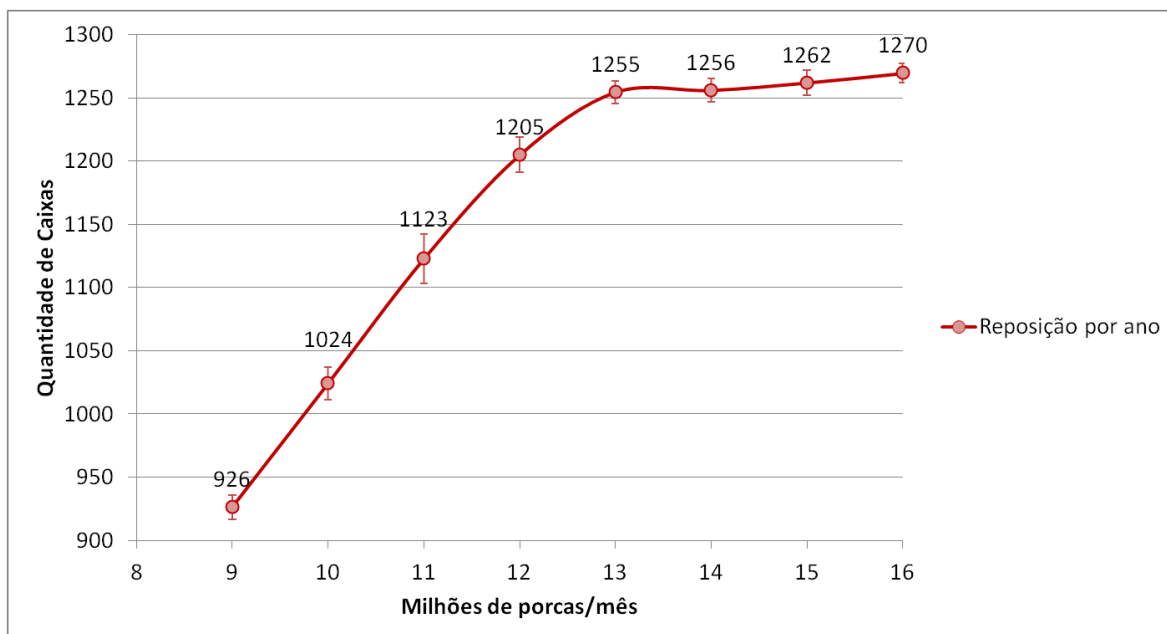


Figura 36 - Caixas quebradas por demanda anual de porcas

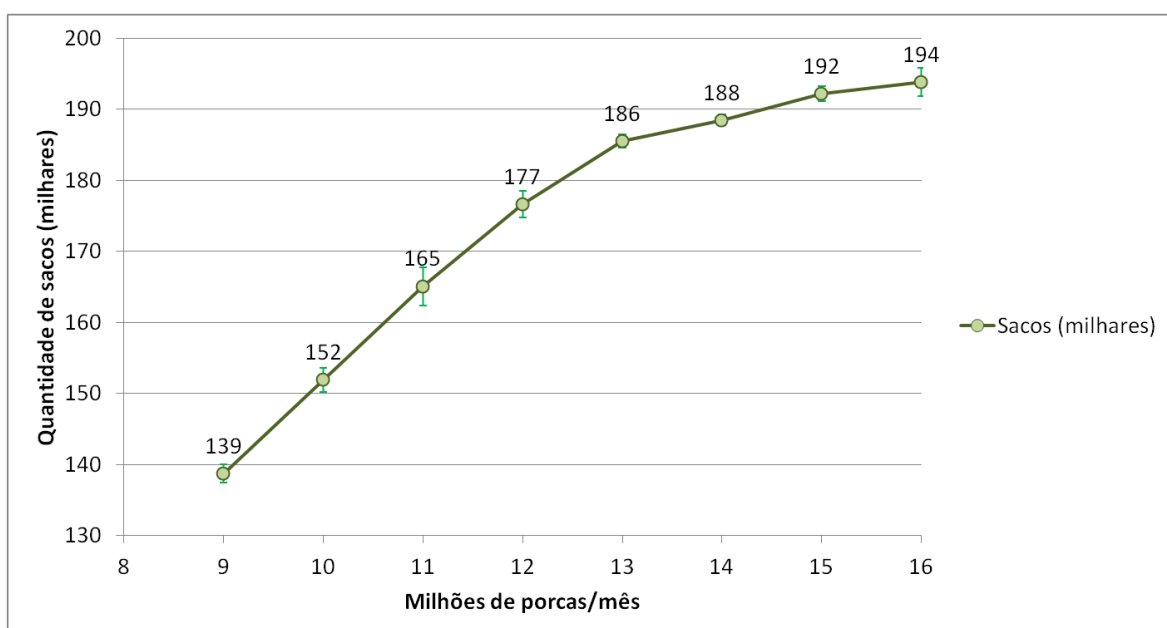


Figura 37 - Sacos (em milhares) necessários por demanda anual de porcas

Observa-se que há uma saturação na necessidade de caixas plásticas para demandas anuais maiores que 13 milhões de porcas enquanto o número de sacos plásticos necessários continua aumentando, apesar deste crescimento ser em uma velocidade cada vez menor.

A partir da Tabela 7, é possível calcular a necessidade acumulada de caixas plásticas e sacos plásticos para os cenários de demanda acima, indicadas na Tabela 8 e na Tabela 9.

Tabela 8 - Necessidade acumulada de caixas plásticas

Total de Caixas acumulado		Ano								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Demanda anual (Milhões de porcas)	9	4.829	5.755	6.681	7.607	8.533	9.459	10.385	11.311	12.237
	10	5.017	6.041	7.065	8.089	9.113	10.137	11.161	12.185	13.209
	11	5.173	6.295	7.417	8.539	9.661	10.783	11.905	13.027	14.149
	12	5.339	6.543	7.747	8.951	10.155	11.359	12.563	13.767	14.971
	13	5.472	6.726	7.980	9.234	10.488	11.742	12.996	14.250	15.504
	14	5.423	6.679	7.935	9.191	10.447	11.703	12.959	14.215	15.471
	15	5.460	6.722	7.984	9.246	10.508	11.770	13.032	14.294	15.556
	16	5.433	6.702	7.971	9.240	10.509	11.778	13.047	14.316	15.585

Tabela 9 - Necessidade acumulada de sacos plásticos

Total de Sacos acumulados (milhares)		Ano								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Demanda (Milhões de porcas)	9	138	276	414	552	690	828	966	1.104	1.242
	10	151	302	453	604	755	906	1.057	1.208	1.359
	11	165	330	495	660	825	990	1.155	1.320	1.485
	12	176	352	528	704	880	1.056	1.232	1.408	1.584
	13	185	370	555	740	925	1.110	1.295	1.480	1.665
	14	188	376	564	752	940	1.128	1.316	1.504	1.692
	15	192	384	576	768	960	1.152	1.344	1.536	1.728
	16	193	386	579	772	965	1.158	1.351	1.544	1.737

3.8.1. Análise da Pegada Ecológica

O cálculo da Pegada Ecológica dos sacos e caixas plásticas foi simplificado utilizando o fator de conversão de 3,6 gha - ano/ton para os dejetos de plástico, retirado do livro *Sharing Nature's Interest* (Wackernagel, Chambers e Simmons, 2000). Tal fator converte o consumo anual de plástico em ton para gha. Para este cálculo, foi considerado que cada caixa plástica pesa 0,955 quilogramas e que cada saco plástico pesa 0,0175 quilogramas. Esses valores foram obtidos através da simples pesagem das duas embalagens.

Com os pesos, a quantidade de sacos plásticos e caixas utilizadas e o fator de conversão, é possível calcular os valores de Pegada Ecológica acumulada ao longo dos anos de operação, conforme Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 - Pegada Ecológica acumulada para o uso de caixas plásticas

Pegada Ecológica acumulada (gha)		Ano								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Demanda (Milhões de porcas)	9	16,6	19,8	23,0	26,2	29,3	32,5	35,7	38,9	42,1
	10	17,2	20,8	24,3	27,8	31,3	34,9	38,4	41,9	45,4
	11	17,8	21,6	25,5	29,4	33,2	37,1	40,9	44,8	48,6
	12	18,4	22,5	26,6	30,8	34,9	39,1	43,2	47,3	51,5
	13	18,8	23,1	27,4	31,7	36,1	40,4	44,7	49,0	53,3
	14	18,6	23,0	27,3	31,6	35,9	40,2	44,6	48,9	53,2
	15	18,8	23,1	27,4	31,8	36,1	40,5	44,8	49,1	53,5
	16	18,7	23,0	27,4	31,8	36,1	40,5	44,9	49,2	53,6

Tabela 11 - Pegada Ecológica acumulada para o uso de sacos plásticos

Pegada Ecológica acumulada (gha)		Ano								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Demanda (Milhões de porcas)	9	8,7	17,4	26,1	34,8	43,5	52,2	60,9	69,6	78,2
	10	9,5	19,0	28,5	38,1	47,6	57,1	66,6	76,1	85,6
	11	10,4	20,8	31,2	41,6	52,0	62,4	72,8	83,2	93,6
	12	11,1	22,2	33,3	44,4	55,4	66,5	77,6	88,7	99,8
	13	11,7	23,3	35,0	46,6	58,3	69,9	81,6	93,2	104,9
	14	11,8	23,7	35,5	47,4	59,2	71,1	82,9	94,8	106,6
	15	12,1	24,2	36,3	48,4	60,5	72,6	84,7	96,8	108,9
	16	12,2	24,3	36,5	48,6	60,8	73,0	85,1	97,3	109,4

O número de caixas necessárias somado com o número de caixas quebradas está na faixa de 5.300 e 5.500 caixas para as demandas anuais de 13 a 16 milhões de porcas, e o número de sacos necessários cresce para esses cenários, apesar de apresentar uma velocidade baixa. Por tal razão, na análise de viabilidade, adota-se um cenário de demanda anual de 12,5 milhões de porcas, no qual o número de sacos plásticos solicitados é menor, mas a quantidade de caixas continua na faixa dos 5.300 a 5.500, mesmo com o aumento da demanda.

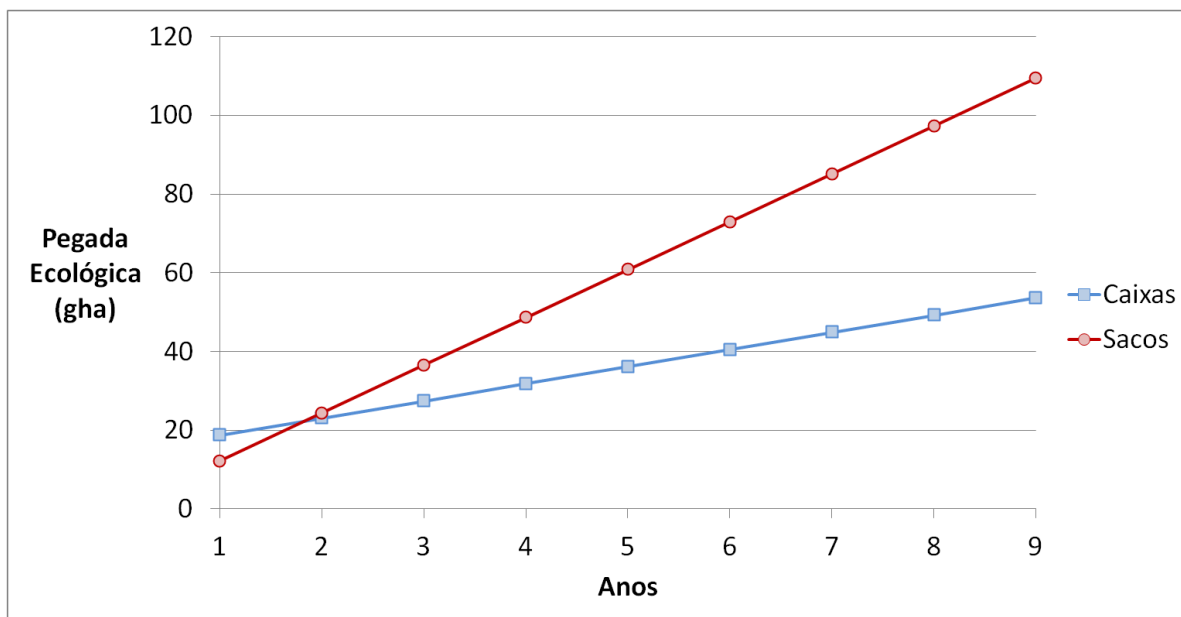


Figura 38 - Comparação entre a Pegada Ecológica acumulada com o uso de caixas plásticas e de sacos, em um cenário de demanda anual de 12,5 milhões de porcas.

A Figura 38 ilustra a Pegada Ecológica acumulada comparando o cenário atual com sacos plásticos com o cenário proposto com caixas reutilizáveis. Observa-se que no curto prazo, em períodos menores que dois anos, o cenário que utiliza as caixas plásticas consome uma quantidade maior de gha. No entanto isto se deve a necessidade inicial de caixas no primeiro ano, visto que para os anos seguintes, só é necessária a reposição das caixas quebradas. A partir dos dois anos de operação, o consumo de gha acumulados no cenário proposto é menor que o cenário atual, viabilizando, do ponto de vista do desenvolvimento sustentável, a substituição das embalagens atuais por caixas plásticas reutilizáveis.

Para cenários de maior demanda de porcas, tem-se uma conclusão semelhante com a do cenário de demanda anual de 12,5 milhões de porcas, dado que a curva de caixas não é afetada de forma drástica e a curva de sacos plásticos apresentará uma inclinação levemente mais acentuada que a ilustrada na Figura 38.

3.8.2. Análise do custo de embalagens por lote produzido

No cálculo do custo de embalagem por lote de porcas, foram considerados os seguintes custos: cada saco plástico custa R\$ 0,27 e cada caixa plástica custa R\$ 2,54. Esses custos representam os preços no atacado que a empresa fabricante de porcas paga.

Os dados de lotes produzidos para cada cenário de demanda anual encontram-se na Tabela 12:

Tabela 12 - Lotes produzidos por cenário anual de demanda de porcas

Demanda anual de porcas (em milhões)								
	9	10	11	12	13	14	15	16
Lotes no ano	3917	4352	4787	5222	5658	5749	5872	5902

Com as informações das Tabelas 8, 9 e 12, é possível construir a tabela de custo de embalagem por lote para os cenários de uso de sacos plásticos e de caixas plásticas:

Tabela 13 - Custo de embalagem por lote

Custo de embalagem por lote (gha)		Primeiro ano		Anos Seguintes	
		Caixas	Sacos	Caixas	Sacos
Demanda (Milhões de porcas)	9	3,13	9,48	0,60	9,48
	10	2,93	9,34	0,60	9,34
	11	2,74	9,28	0,60	9,28
	12	2,60	9,07	0,59	9,07
	13	2,46	8,80	0,56	8,80
	14	2,40	8,80	0,55	8,80
	15	2,36	8,80	0,55	8,80
	16	2,34	8,80	0,55	8,80

Observa-se que, mesmo no primeiro ano, no qual há o custo inicial das caixas plásticas, tal opção é financeiramente mais vantajosa do que o uso dos sacos plásticos. Para os anos seguintes, a economia é ainda maior, dado que o custo de

embalagens para cada lote, utilizando as caixas plásticas, seria de apenas 6% do custo do cenário original. Portanto o cenário proposto, em termos de eficiência do capital alocado nas embalagens, é superior ao cenário atual.

4. Conclusão

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo em rede de Petri Colorida de uma cadeia de suprimentos que englobava uma fábrica de médio porte, seus principais clientes e fornecedores. O modelo permitiu uma visão detalhada do fluxo de informações e de materiais dentro da cadeia, e em especial dentro da fábrica em estudo. Através da coleta e análise de dados extraídos desse modelo, foi possível analisar o desempenho e a sustentabilidade de uma cadeia de suprimentos.

O modelo completo da cadeia de suprimentos e da fábrica foi construído de forma a obter o limite máximo de produção de porcas que o sistema pode suprir em um determinado período, através da variação dos cenários de demanda e da observação da quantidade de lotes produzidos. Este limite máximo de produção foi utilizado para estimar a quantidade mínima de caixas plásticas retornáveis necessárias, no lugar dos sacos plásticos atualmente utilizados, para que não ocorra a falta de embalagens durante o processo, mesmo em situações de demanda acima da média.

Após a obtenção da quantidade de caixas plásticas retornáveis e de sacos plásticos necessários, seguida da simulação do modelo, foi possível extrair as informações necessárias para o levantamento de indicadores de desempenho e de sustentabilidade. Concluiu-se que a troca de sacos por caixas plásticas retornáveis tem um retorno positivo, em termos de sustentabilidade ambiental e de desempenho financeiro.

O número de simulações utilizado no estudo de caso foi considerado suficiente para uma estimativa do custo de embalagens por lote de porca da Pegada Ecológica de cada tipo de embalagem. Entretanto, observa-se que os resultados obtidos no estudo de caso podem diferir dos resultados obtidos na aplicação do sistema real, em função das premissas adotadas e de possíveis imprecisões dos dados de produção coletados. Para a aplicação no sistema real, recomenda-se um número

maior de simulações e uma discussão aprofundada das premissas e dados de produção a serem considerados.

Quanto à análise do desenvolvimento sustentável, observou-se que mesmo com a análise de diversos fatores ambientais isolados, como a utilização de materiais e o descarte de sucata, uma análise agregada é de difícil execução. Isso se deve ao fato de que uma análise agregada necessita de dados regionais ou nacionais de produção e de consumo nas diversas cadeias produtivas, mas há poucos trabalhos desse tipo no Brasil.

O modelo construído neste trabalho pode ser utilizado para a análise de outros pontos da cadeia de suprimentos, como os setores de estampagem, de rosqueamento ou de limpeza. Pode-se assim avaliar a influência da variação dos modos de entrega (única, diária ou semanal) nos custos envolvidos ou identificar o volume de estoque de matéria-prima ideal para a melhor utilização do capital empregado.

A necessidade do uso de embalagens para o transporte e manipulação de produtos torna relevante possíveis adaptações da metodologia, modelo e análise utilizados em outras cadeias de suprimentos.

Referência Bibliográfica

Bodini, A. **Building a systemic environmental monitoring and indicators for sustainability: What has the ecological network approach to offer?** Dissertation. University of Parma, Itália. 2011.

Cassandras C.G.; Lafortune S. **Introduction to discrete event systems, Second Edition.** Ed. Springer. New York . 2008.

Chambers, N.; Simmons, C.; Wackernagel, M. **Sharing Nature's Interest: Ecological Footprints as an indicator of sustainability.** London: Earthscan Publications Ltd, 2000.

Coelli, R. **Introduction to Efficiency and Productivity Analysis, Second Edition.** Ed. Springer. New York. 2005.

Ferraz, J.C; Kupper, B; Hauguenauer, L. **Made in Brazil: desafios competitivos para a indústria.** Rio de Janeiro. Ed. Campus, 1997.

Ganeshan, R.; Terry P. H. **An Introduction to Supply Chain Management.** Departamento de ciências administrativas e sistemas de informação, Penn State University. University Park. 1995.

Hardi, P., Zdan, T. J. **The Dashboard of Sustainability.** draft paper, International Institute for Sustainable Development. 2000.

Hugos, Michael. **Essentials of supply chain management.** Ed. John Wiley and Sons, Inc. Nova Jersey. 2003

International Human Development Programme (IHD) e Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Inclusive Wealth Report. 2012.

Jensen, K.; **Coloured Petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical use.** vol. 1. New York. Ed. Springer Verlag, 1992.

Jensen, K; Kristensen, L. M.; Wells L. **Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems**. Department of Computer Science, University of Aarhus. Dinamarca. 2006.

Lambert, D. M.; James R. S.; and Lisa M. E. **Fundamentals of Logistics Management**. Ed. Irwin/McGraw-Hill. Boston, Massachusetts. 1998.

Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). **Science for Sustainability - The Potential for German-Brazilian Cooperation**, Proceedings of the 1st German-Brazilian Conference on Research for Sustainability. 2009.

Miyagi, P. E. **Controle Programável, Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos**. Ed. Edgard Blücher. São Paulo. 1996

Miyagi, P. E. **Introdução a Simulação Discreta**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo. 2006.

Murata, T. **Petri nets: properties, analysis and applications**. Proceedings of the IEEE 77. Vol. 77, No. 4, pages 541-580. 1989.

National Accounts Review Committee, Standards Committee and Global Footprint Network. **National Footprint Accounts Guidebook**. 2008.

National Accounts Review Committee, Standards Committee and Global Footprint Network. **National Footprint Accounts Method Paper**. 2010.

Ogata, K. **Engenharia de controle moderno. 4ª edição**. Ed. Pearson Prentice Hall do Brasil. São Paulo. 2006.

Porter, Michael E. **Competitive Strategy**. New York. Ed. Free Press, 1980.

World Commission on Environment and Development (WCED). **Our Common Future**. Oxford: Oxford University Press. 1987.

Prescott-Allen, R. **The Wellbeing of Nations: a country-by-country index of quality of life and the environment.** Washington. Ed. Island Press, 2001.

Van Bellen, H. M. **Desenvolvimento Sustentável: Uma Descrição das Principais Ferramentas de Avaliação.** Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. Campinas, Brasil. 2004

Villani, E.; Miyagi, P.E.; Vallete, R. **Modeling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems. A Petri Net Approach.** Ed. Springer-Verlag. London. 2007.

Wackernagel, M.; Rees, W. **Our Ecological Footprint.** Gabriola Island, BC and Stony Creek, CT: New Society Publishers, 1996.

APÊNDICE

Neste apêndice, as ferramentas do CPN Tools utilizadas no trabalho são apresentadas: cores, variáveis, monitores, a RPC, sua hierarquia (com todas as transições substitutas) e as tabelas de dados importados para o modelo.

4.1.1. Declarações Padrão

Declarações utilizadas por todo o modelo.

a) Valores:

```
▼ Declarations
  ▼ -Declaracoes Padrao
    ▼ -Valores
      ▼ val P_HIGH = 100;
      ▼ val P_NORMAL = 1000;
      ▼ val P_LOW = 10000;
      ▼ val nTiposMatPrimas = 7;
      ▼ val nTiposProdutos = 30;
      ▼ val tMinuto = 1;
      ▼ val tHora = 60;
      ▼ val tDia = 528;
      ▼ val tDevolucaoCaixa = 2640;
      ▼ val tSemana = 2640;
      ▼ val tMes = 11088;
      ▼ val tTotal = 133056;
      ▼ val tLimpeza_1 = 22;
      ▼ val tLimpeza_2_1 = 22;
      ▼ val tLimpeza_2_2 = 22;
      ▼ val tEmbalagemSaco = 12;
      ▼ val tEmbalagemCaixa = 17;
      ▼ val pesoLote = 170
      ▼ val sacosPorLote = 40;
      ▼ val caixasPorLote = 29;
      ▼ val pesoCarretel = 1700;
      ▼ val pesoSucataEstampagem = 16;
      ▼ val pesoSucataRosqueamento = 12;
      ▼ val cicloProcesso = 10;
      ▼ val chanceInspecao = 0.0026;
      ▼ val chanceManutencao = 10;
      ▼ val usoDeCaixas = false;
      ▼ val vidaCaixa = 100;
      ▼ val vidaCarretel = 10;
```

b) Cores:

- ▼ -Declaracoes Padrao
 - ▶ -Valores
 - ▼ -Cores
 - ▼ colset E = with e;
 - ▼ colset F = with f timed;
 - ▼ colset INT = int;
 - ▼ colset STRING = string;
 - ▼ colset BOOL = bool;
 - ▼ colset UNIT = unit timed;
 - ▼ colset QTDE = int;
 - ▼ colset CAIXA = unit timed;
 - ▼ colset SACO = unit;
 - ▼ colset CARRETEL =unit with C;
 - ▼ colset PRAZO = int;

c) Variáveis:

- ▼ -Declaracoes Padrao
 - ▶ -Valores
 - ▶ -Cores
 - ▼ -Variaveis
 - ▼ var vBool:BOOL;
 - ▼ var vInt:INT;
 - ▼ var vCarretel:CARRETEL;
 - ▼ var vQtde:QTDE;

d) Funções:

- ▼ -Declaracoes Padrao
 - ▶ -Valores
 - ▶ -Cores
 - ▶ -Variaveis
 - ▼ -Funcoes
 - ▼ fun fDivC (n1:INT, n2:INT) = ceil(((IntInfToReal 0 (IntInf.fromInt n1)) / (IntInfToReal 0 (IntInf.fromInt n2))))
 - ▼ fun fDiv (n1:INT, n2:INT) = round(((IntInfToReal 0 (IntInf.fromInt n1)) / (IntInfToReal 0 (IntInf.fromInt n2))))
 - ▼ fun fMinuto() = IntInf.toInt(time())
 - ▼ fun fHora() = fMinuto() div tHora
 - ▼ fun fDia() = fMinuto() div tDia

4.1.2. I/O (*Input/Output*)

Declarações utilizadas para importar ou exportar dados.

a) *Input*: Produto

a.1) Cores:

```

▼ -I/O
  ▼ globref outfile = TextIO.stdOut;
  ▼ -Input: Produto
    ▼ -Cores
      ▼ colset TIPO_PRODUTO = int with 0..nTiposProdutos;
      ▼ colset TIPO_MAT_PRIMA = int with 0..7;
      ▼ colset TAM_LOTE = int;
      ▼ colset MAQ_ESTAMPAGEM = int;
      ▼ colset MAQ_ROSQUEAMENTO = int;
      ▼ colset TEMPO_INSPECAO = int;
      ▼ colset TEMPO_EMBALAGEM = int;
      ▼ colset PEDIDO_MIN = int;
      ▼ colset PEDIDO_MAX = int;
      ▼ colset ANTECEDENCIA = int;
      ▼ colset ENTREGA = with U | S | D;
      ▼ colset IN_PRODUTO = product TIPO_PRODUTO*TIPO_MAT_PRIMA*
        TAM_LOTE*MAQ_ESTAMPAGEM*MAQ_ROSQUEAMENTO*TEMPO_INSPECAO*
        TEMPO_EMBALAGEM*PEDIDO_MIN*PEDIDO_MAX*ANTECEDENCIA*
        ENTREGA declare output_col, input_ms;

```

a.2) Variáveis:

```

▼ -I/O
  ► globref outfile
  ▼ -Input: Produto
    ► -Cores
    ▼ -Variaveis
      ▼ var vTipoProduto:TIPO_PRODUTO;
      ▼ var vPrazo:PRAZO;
      ▼ var vTipoMatPrima:TIPO_MAT_PRIMA;
      ▼ var vTamLote:TAM_LOTE;
      ▼ var vMaqEstampagem:MAQ_ESTAMPAGEM;
      ▼ var vMaqRosqueamento:MAQ_ROSQUEAMENTO;
      ▼ var tInspecao:TEMPO_INSPECAO;
      ▼ var tEmbalagem:TEMPO_EMBALAGEM;
      ▼ var vPedidoMin:PEDIDO_MIN;
      ▼ var vPedidoMax:PEDIDO_MAX;
      ▼ var vAntecedencia:ANTECEDENCIA;
      ▼ var vEntrega:ENTREGA;
      ▼ var vProduto:IN_PRODUTO;
      ▼ globref refProduto = empty: IN_PRODUTO ms;

```

b) *Input*: Matéria-Prima

```

▼ -I/O
  ► globref outfile
  ► -Input: Produto
  ▼ -Input: Materia Prima
    ▼ colset IN_MAT_PRIMA_INICIAL = product TIPO_MAT_PRIMA*
      QTDE declare output_col;
    ▼ colset IN_PEDIDO_MAT_PRIMA = product TIPO_MAT_PRIMA*
      PRAZO declare output_col, input_ms;
    ▼ var vInMatPrima:IN_MAT_PRIMA_INICIAL;
    ▼ var vInPedidoMatPrima:IN_PEDIDO_MAT_PRIMA;
    ▼ globref refMatPrimaInicial = empty:IN_MAT_PRIMA_INICIAL ms;
    ▼ globref refPedidoMatPrimaInicial = empty: IN_PEDIDO_MAT_PRIMA ms;

```

c) *Input*: Estampagem

c.1) Cores:

```

▼ -I/O
  ► globref outfile
  ► -Input: Produto
  ► -Input: Materia Prima
  ▼ -Input: Estampagem
    ▼ -Cores
      ▼ colset NUM_MAQ = INT;
      ▼ colset SUCATA = QTDE;
      ▼ colset TEMPO_SETUP = INT;
      ▼ colset TEMPO_ESTAMPAGEM = INT;
      ▼ colset IN_ESTAMPADEIRA = product MAQ_ESTAMPAGEM*
        NUM_MAQ*TEMPO_ESTAMPAGEM*TEMPO_SETUP*SUCATA;

```

c.2) Variáveis:

```

▼ -I/O
  ► globref outfile
  ► -Input: Produto
  ► -Input: Materia Prima
  ▼ -Input: Estampagem
    ► -Cores
    ▼ -Variaveis
      ▼ var vNumMaq:NUM_MAQ;
      ▼ var tEstampagem:TEMPO_ESTAMPAGEM;
      ▼ var vEstampadeira:IN_ESTAMPADEIRA;

```

c) *Input*: Rosqueamento

- ▼ -I/O
 - ▶ globref outfile
 - ▶ -Input: Produto
 - ▶ -Input: Materia Prima
 - ▶ -Input: Estampagem
 - ▼ -Input: Rosqueamento
 - ▼ -Cores
 - ▼ colset TEMPO_ROSQUEAMENTO = INT;
 - ▼ -Variaveis
 - ▶ colset IN_ROSQUEADEIRA

4.1.3. Objetos do modelo

Declarações das entidades que são utilizadas nos fluxos de produtos e materiais, de informações ou de logística reversa.

a) Cores:

- ▼ -Objetos do Modelo
 - ▼ -Cores
 - ▼ colset MAT_PRIMA = product TIPO_MAT_PRIMA*QTDE;
 - ▼ colset PRODUTO_EM_FABRIC = product TIPO_PRODUTO*PRAZO*QTDE timed;
 - ▼ colset MAQ = INT;
 - ▼ colset SETUP = product MAQ*TIPO_PRODUTO;
 - ▼ colset PROCESSO = product MAQ*PRODUTO_EM_FABRIC timed;
 - ▼ colset LISTA_FABRICACAO = list PRODUTO_EM_FABRIC;
 - ▼ colset LISTA_MAQ = product MAQ*LISTA_FABRICACAO;
 - ▼ colset QTDE_MAT_PRIMA = QTDE;
 - ▼ colset NUMERO_ENTREGAS = int;
 - ▼ colset PRODUTO_FINAL = PRODUTO_EM_FABRIC;
 - ▼ colset QTDE_LOTE = QTDE;
 - ▼ colset QTDE_BOBINA = QTDE;
 - ▼ colset ORDEM_FABRICACAO = product TIPO_PRODUTO*TIPO_MAT_PRIMA*PRAZO*QTDE_LOTE;
 - ▼ colset PEDIDO_INTERM = product TIPO_PRODUTO*NUMERO_ENTREGAS*TIPO_MAT_PRIMA*TAM_LOTE*PRAZO*ENTREGA*QTDE;
 - ▼ colset QTDE_CARRETEIS = int;
 - ▼ colset PEDIDO_MAT_PRIMA = TIPO_MAT_PRIMA timed;
 - ▼ colset PEDIDO_PRODUTO = product TIPO_PRODUTO*ANTECEDENCIA*ENTREGA*QTDE timed;
 - ▼ colset DB_PEDIDO_PRODUTO = product TIPO_PRODUTO*PEDIDO_MIN*PEDIDO_MAX*ANTECEDENCIA*ENTREGA timed;
 - ▼ colset DB_FABRICACAO = product TIPO_PRODUTO*TIPO_MAT_PRIMA*TAM_LOTE;

```

▼ colset DB_ESTAMPAGEM = product TIPO_PRODUTO*MAQ_ESTAMPAGEM;
▼ colset DB_ROSQUEAMENTO = product TIPO_PRODUTO*MAQ_ROSQUEAMENTO;
▼ colset DB_INSPECAO = product TIPO_PRODUTO*TEMPO_INSPECAO;
▼ colset N_ENTREGAS = int;
▼ colset PRODUTO_ESTAMPAGEM = product MAQ_ESTAMPAGEM*TIPO_PRODUTO*
  PRAZO*QTDE;
▼ colset LISTA_ESTAMPAGEM = list PRODUTO_ESTAMPAGEM;
▼ colset TEMPO_PROCESSO = INT;
▼ colset DADOS_MAQ = product NUM_MAQ*TEMPO_PROCESSO*TEMPO_SETUP*
  SUCATA;

```

b) Variáveis:

```

▼ -Objetos do Modelo
  ► -Cores
  ▼ -Variaveis
    ▼ var vMatPrima:MAT_PRIMA;
    ▼ var vSucata:SUCATA;
    ► var vProdutoEmFabricacao
    ▼ var vMaq:MAQ;
    ▼ var vListaFabricacao:LISTA_FABRICACAO;
    ▼ var vListaFabricacao2:LISTA_FABRICACAO;
    ▼ var vProdutoEstampagem:PRODUTO_ESTAMPAGEM;
    ▼ var vListaEstampagem:LISTA_ESTAMPAGEM;
    ▼ var vListaEstampagem2:LISTA_ESTAMPAGEM;
    ▼ var vOrdemFabricacao:ORDEM_FABRICACAO;
    ▼ var vProdutoFinal:PRODUTO_FINAL;
    ▼ var vQuantidade:QTDE;
    ▼ var vPedidoProduto:PEDIDO_PRODUTO;
    ▼ var vDBpedidoProduto:DB_PEDIDO_PRODUTO;
    ▼ var vQtdeBobina:QTDE;
    ▼ var vQtdeLote:QTDE;
    ▼ var vDBfabricacao:DB_FABRICACAO;
    ▼ var vQtdeCarreteis: QTDE_CARRETEIS;
    ▼ var vPedidoMatPrima:PEDIDO_MAT_PRIMA;
    ▼ var vNentregas:N_ENTREGAS;
    ▼ var vPedidoInterm:PEDIDO_INTERM;
    ▼ var vQtdeDia:QTDE;
    ▼ var vQtdeUsada:QTDE;
    ▼ var vQtdeMatPrima:QTDE_MAT_PRIMA;
    ▼ var vQtdeMatPrimaEstoque:QTDE;
    ▼ var vQtdeMatPrimaIdeal:QTDE;
    ▼ var vQtdeMatPrimaFila:QTDE;
    ▼ var vTempoInspecao:TEMPO_INSPECAO;
    ▼ var tDelay:INT;
    ▼ var tProcesso:TEMPO_PROCESSO;
    ▼ var tSetup:TEMPO_SETUP;
    ▼ var vTipoProdutoAnterior:TIPO_PRODUTO;
    ▼ var vManutencao:INT;
    ▼ var vSetup:INT;
    ▼ var vProcesso:INT;
    ▼ globref refFilaPedidos = empty:PEDIDO_MAT_PRIMA tms;
    ▼ globref refManutencao = 0:INT;
    ▼ globref refSetup = 0:INT;
    ▼ globref refProcesso = 0:INT;

```

c) Funções:

```

▼ -Objetos do Modelo
  ► -Cores
  ► -Variaveis
  ▼ -Funcoes
    ▼ fun fQtdeDia(q:QTDE, n:N_ENTREGAS, t:TAM_LOTE) =
      if n = 1
      then q
      else fDiv(fDiv(q,n), t)*t
    ▼ fun fPrazo(ent:ENTREGA) =
      case ent of
        U => 0
      | S => 5*tDia
      | D => 1*tDia
    ▼ fun fOrdenaFabricacao(e1:PRODUTO_EM_FABRIC, e2:PRODUTO_EM_FABRIC) =
      INT.lt(#2 e1, #2 e2)
    ▼ fun fOrdenaEstampagem(e1:PRODUTO_ESTAMPAGEM, e2:PRODUTO_ESTAMPAGEM) =
      INT.lt(#3 e1, #3 e2)
    ▼ fun fPedidoMatPrima(ide:QTDE, est:QTDE, fil:QTDE) =
      ide - fDiv(est, pesoCarretel) - fDiv(fil, pesoCarretel)
    ▼ fun fMapEstampagem(p:PRODUTO_EM_FABRIC, tipo:TIPO_PRODUTO) =
      if #1 p = tipo
      then p
      else (0, 0, 0)

```

4.1.4. Monitores

a) MonitorFilaPedidosMatPrima

```

▼ Monitors
  ▼ -Monitores internos
    ▼ MonitorFilaPedidosMatPrima
      ▼ Type: Data collection
        □ Timed
        □ Logging
      ▼ Nodes ordered by pages
        ► Emissao_de_pedidos_de_materia_prima
      ▼ Predicate
        fun pred (bindelem,
          Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Fila_de_pedidos_1_mark : PEDIDO_MAT_PRIMA tms) =
        let
          fun predBindElem (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Emissao_de_pedidos (1,
            {vPedidoMatPrima})) = true
          | predBindElem (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Emissao_de_pedidos_de_materia_prima (1,
            {vInt,vQtdeMatPrimaEstoque,
              vQtdeMatPrimaFila,
              vQtdeMatPrimaIdeal,vTipoMatPrima})) = true
          | predBindElem (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'inicializacao_de_pedidos_de_materia_prima (1,
            {vPrazo,vTipoMatPrima})) = true
          | predBindElem _ = false
        in
          predBindElem bindelem
        end
      ▼ Observer
        fun obs (bindelem,
          Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Fila_de_pedidos_1_mark : PEDIDO_MAT_PRIMA tms) =
        let
          fun obsBindElem (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Emissao_de_pedidos (1,
            {vPedidoMatPrima})) = 0
          | obsBindElem (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Emissao_de_pedidos_de_materia_prima (1,
            {vInt,vQtdeMatPrimaEstoque,
              vQtdeMatPrimaFila,
              vQtdeMatPrimaIdeal,vTipoMatPrima})) = 0
          | obsBindElem (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'inicializacao_de_pedidos_de_materia_prima (1,
            {vPrazo,vTipoMatPrima})) = 0
          | obsBindElem _ = ~1
        in
          refFilaPedidos := Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Fila_de_pedidos_1_mark;
          obsBindElem bindelem
        end

```

```

▼ Init function
  fun init (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Fila_de_pedidos_1_mark : PEDIDO_MAT_PRIMA tms) =
    NONE
▼ Stop
  fun stop (Emissao_de_pedidos_de_materia_prima'Fila_de_pedidos_1_mark : PEDIDO_MAT_PRIMA tms) =
    NONE

```

b) Controle: ParadaFinal

```

▼ Monitors
  ▶ -Monitores internos
  ▼ -Controle
    ▼ Parada final
      Type: Break point
      ▼ Nodes ordered by pages
        ▼ Painel_de_controle
          Parar_simulacao (transition)
        ▼ Predicate
          fun pred (bindelem) =
            let
              fun predBindElem (Painel_de_controle'Parar_simulacao (1, { })) = true
                | predBindElem _ = false
            in
              predBindElem bindelem
            end

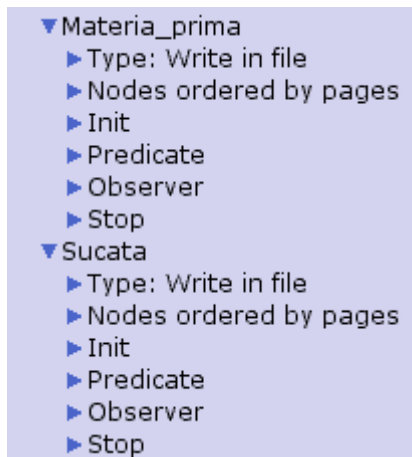
```

c) Monitores para a Validação:

```

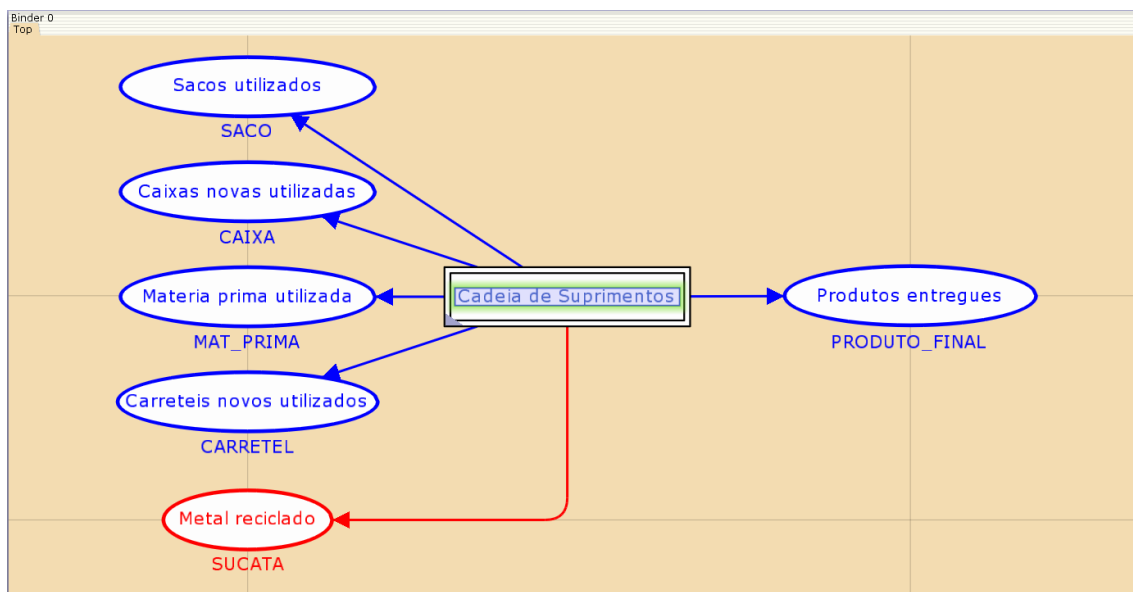
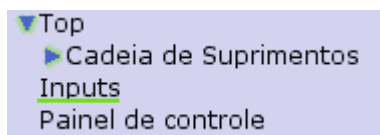
▼ Monitors
  ▶ -Monitores internos
  ▶ -Controle
  ▼ -Validacao
    ▼ Processo
      ▶ Type: Write in file
      ▶ Nodes ordered by pages
      ▶ Init
      ▶ Predicate
      ▶ Observer
      ▶ Stop
    ▼ Embalagem
      ▶ Type: Write in file
      ▶ Nodes ordered by pages
      ▶ Init
      ▶ Predicate
      ▶ Observer
      ▶ Stop
    ▼ Entrada_pedidos
      ▶ Type: Write in file
      ▶ Nodes ordered by pages
      ▶ Init
      ▶ Predicate
      ▶ Observer
      ▶ Stop

```

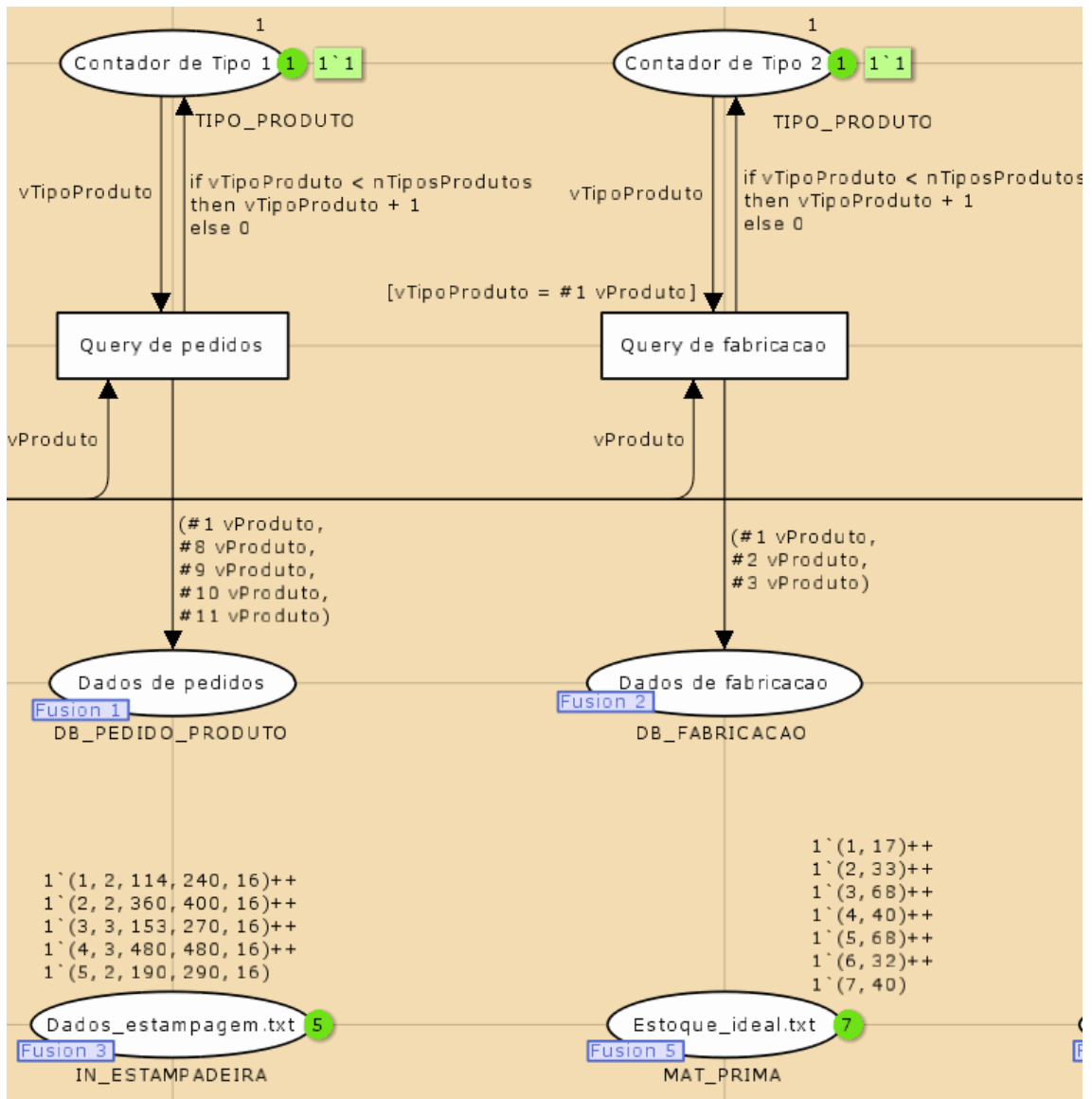


4.1.5. RPC e Hierarquia

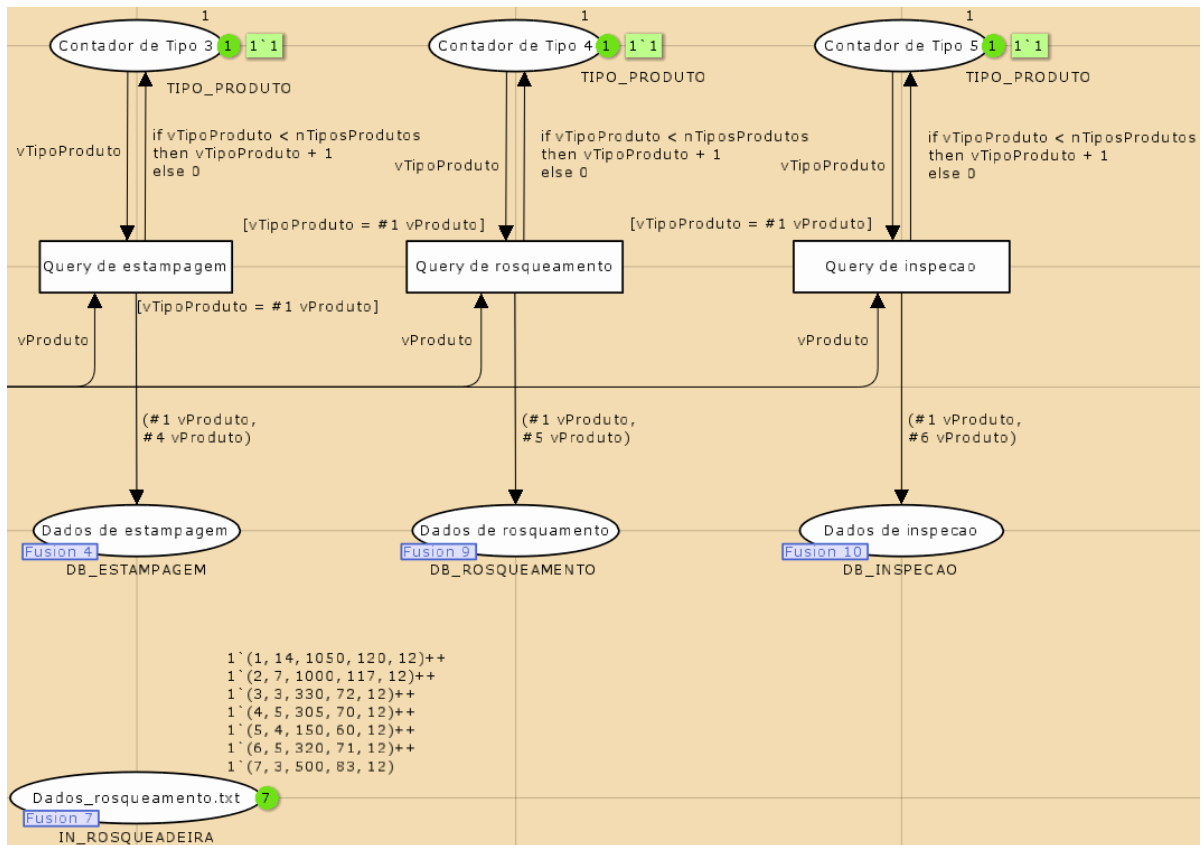
a) Top



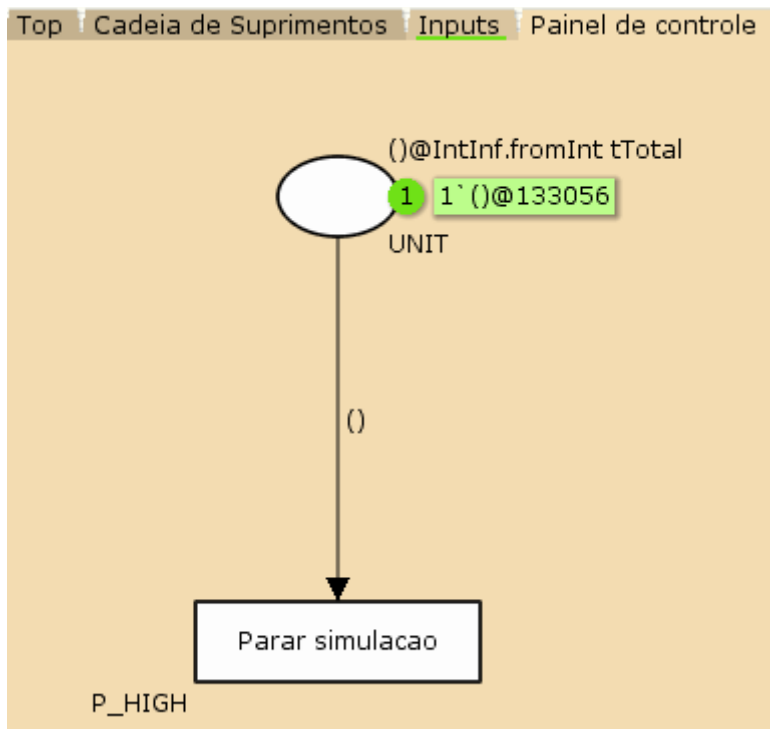
a.1) Cadeia de Suprimentos



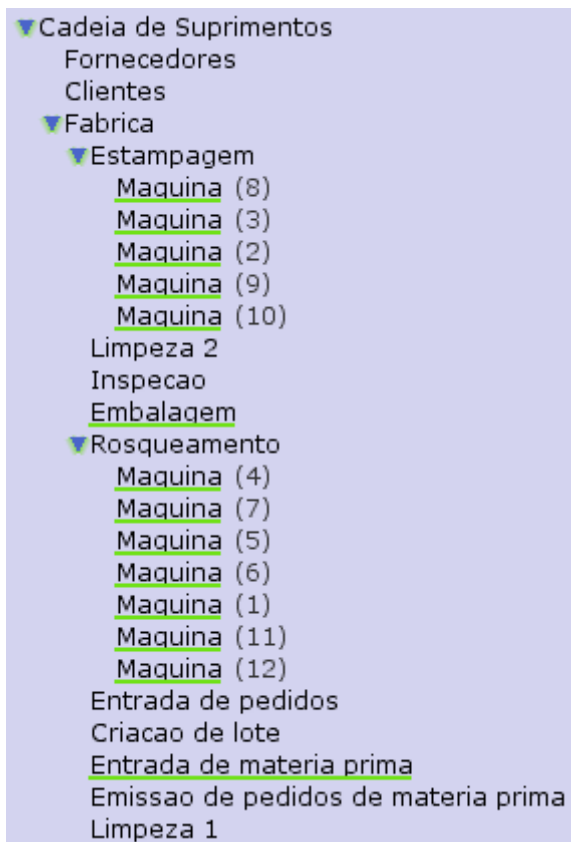
(parte 3)



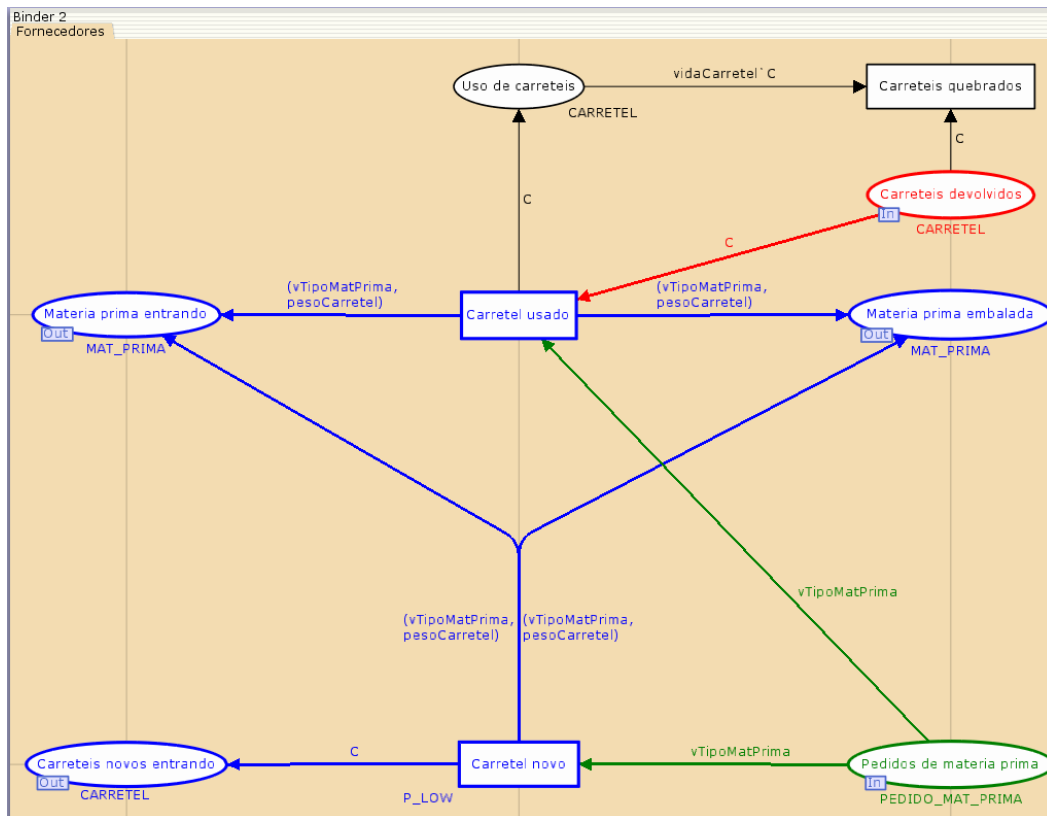
a.3) Painel de Controle



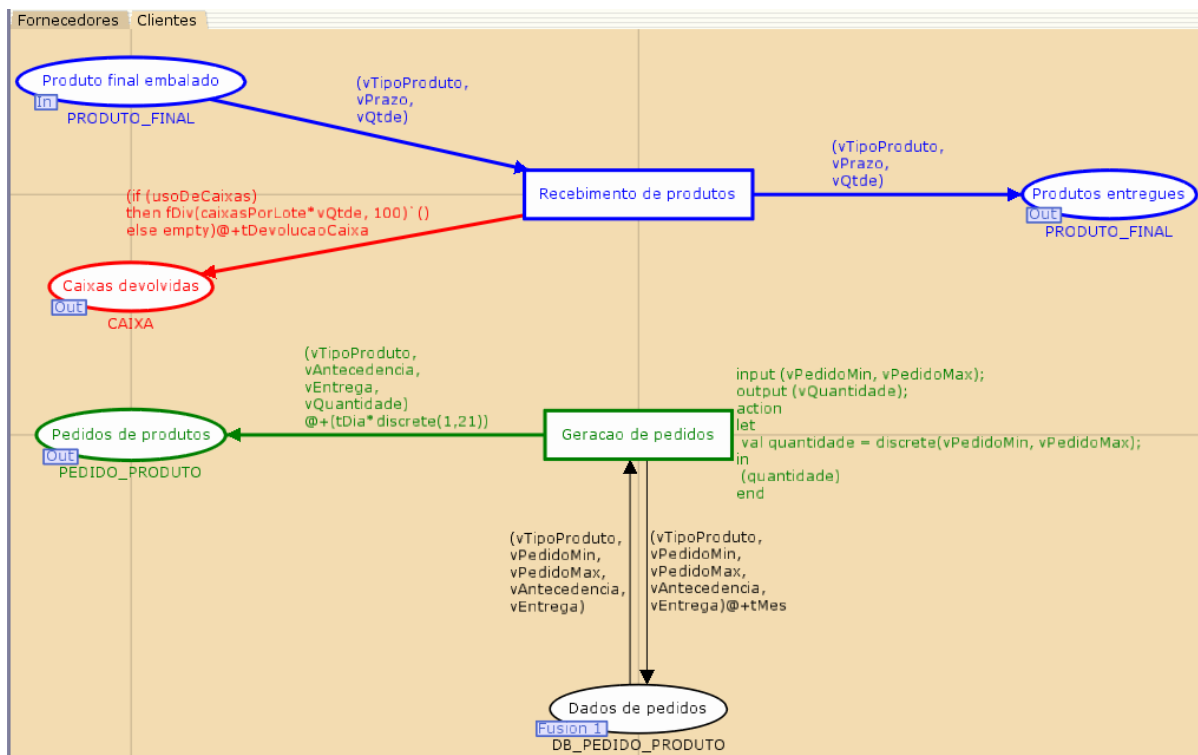
b) Cadeia de suprimentos



b.1) Fornecedores

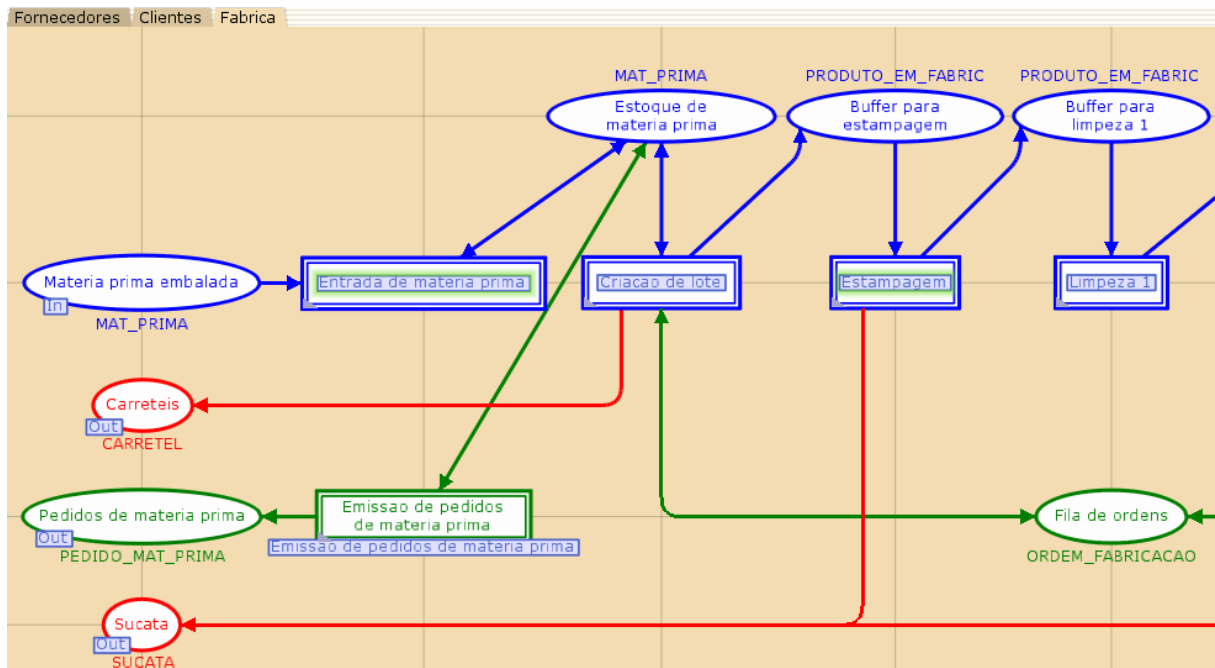


b.2) Clientes

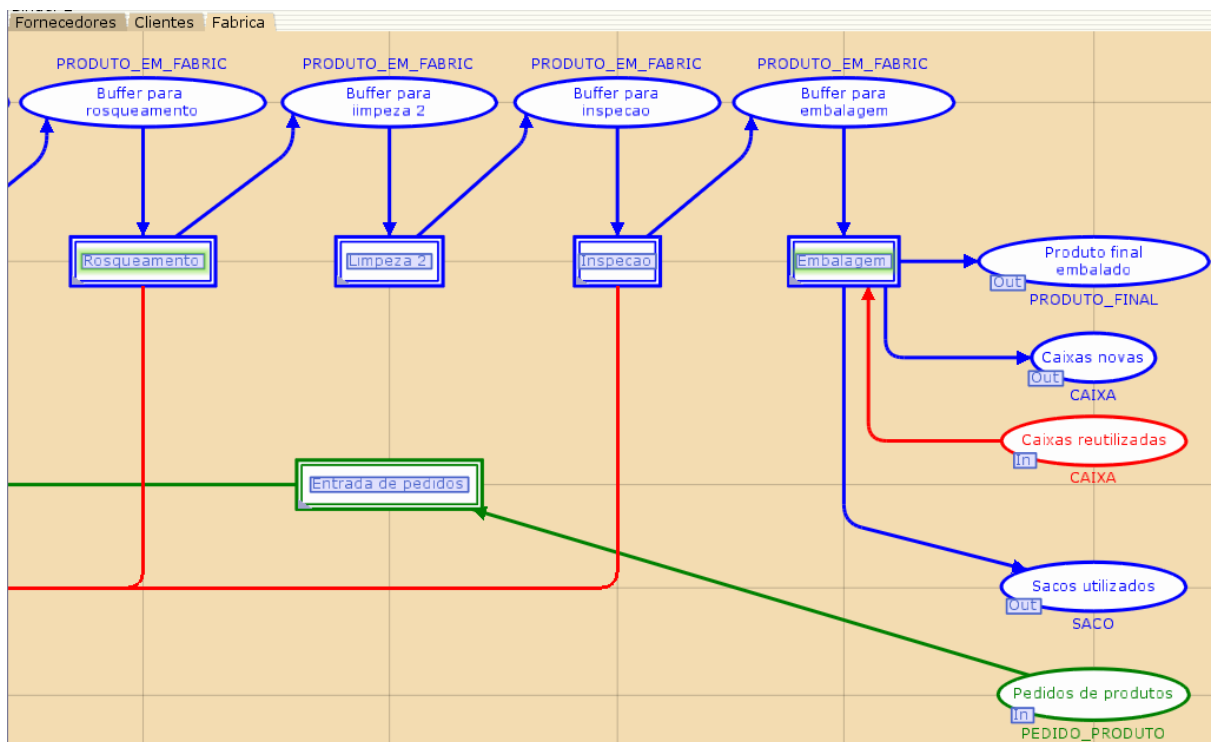


b.3) Fábrica

(parte 1)

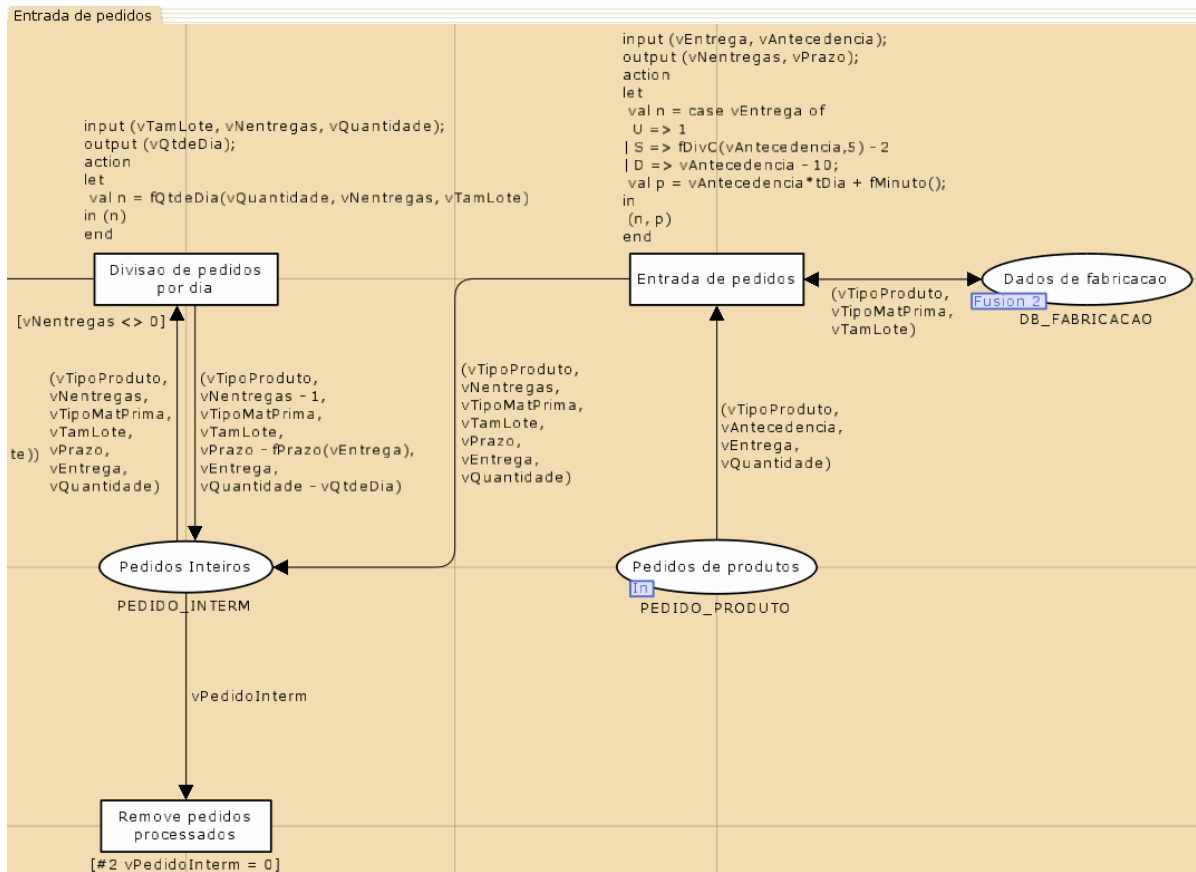


(parte 2)

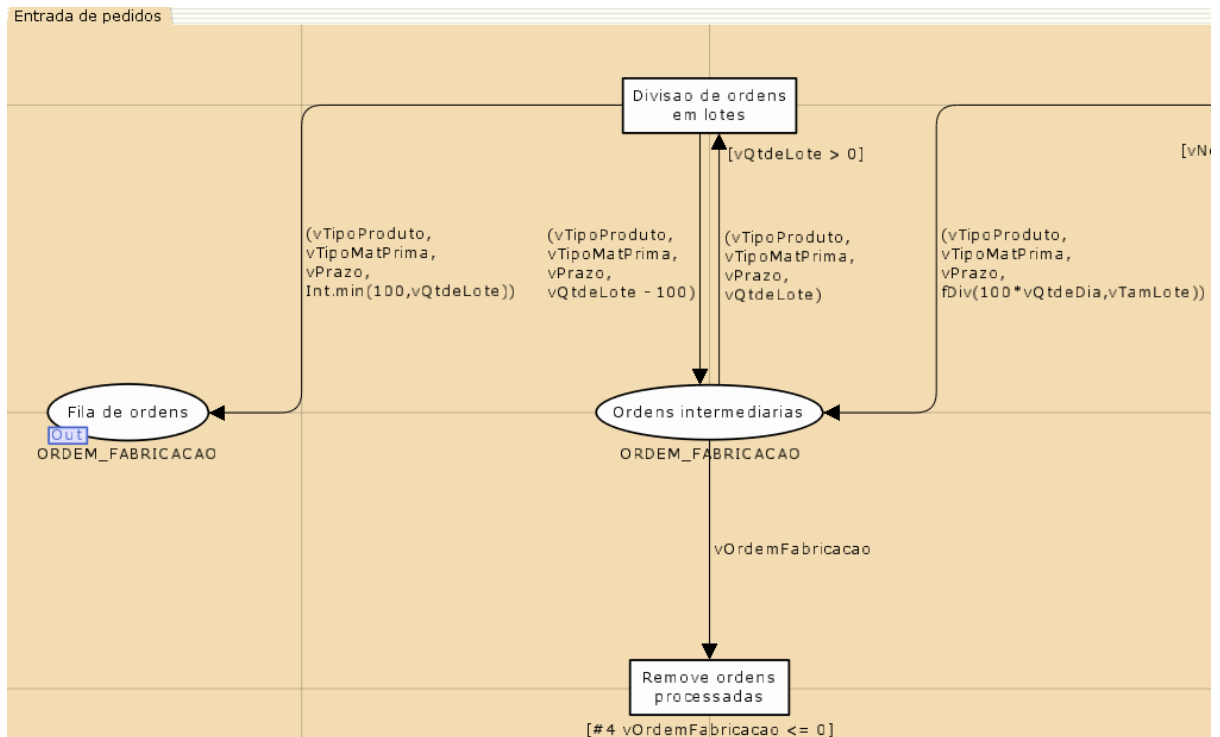


b.3.1) Entrada de pedidos

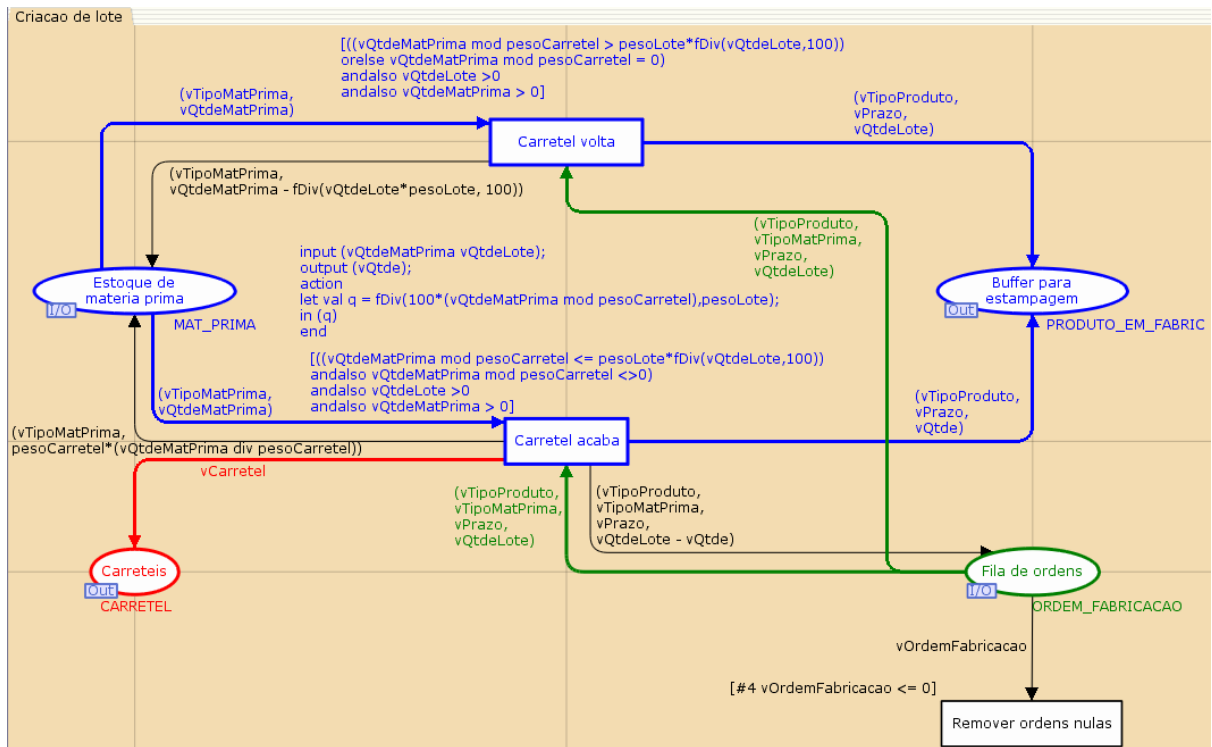
(parte 1)



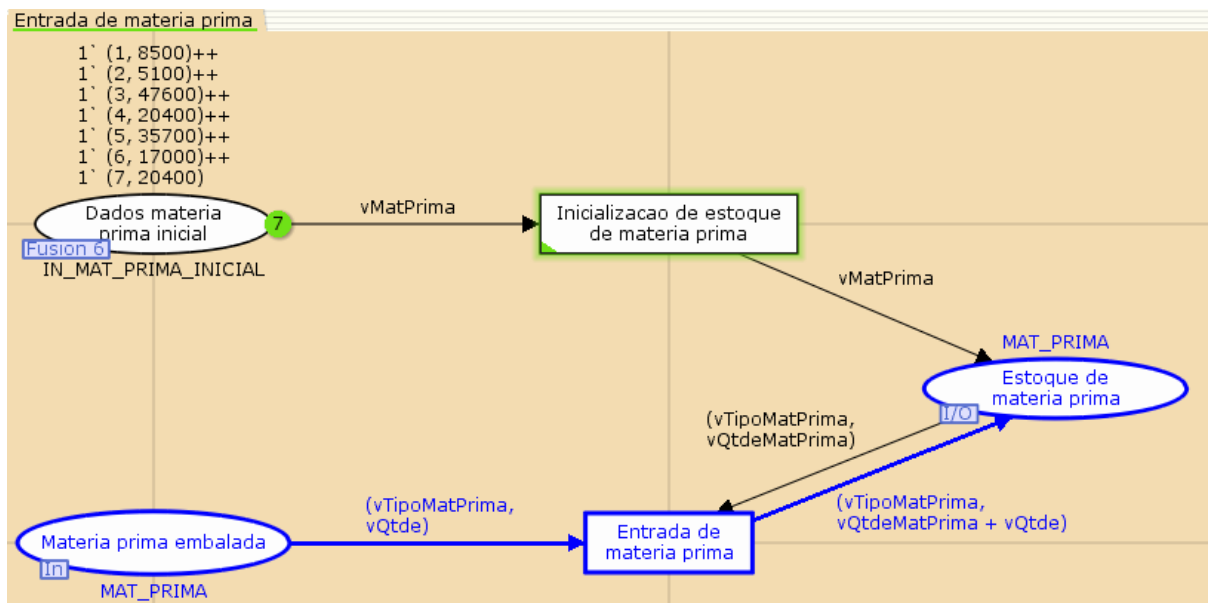
(parte 2)



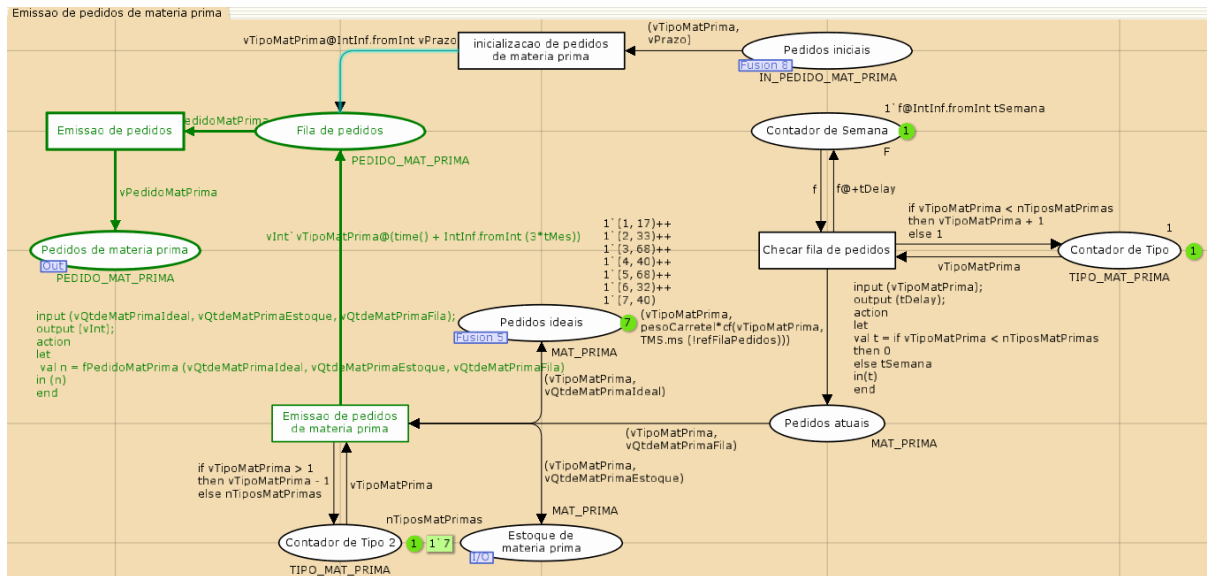
b.3.2) Criação de lote



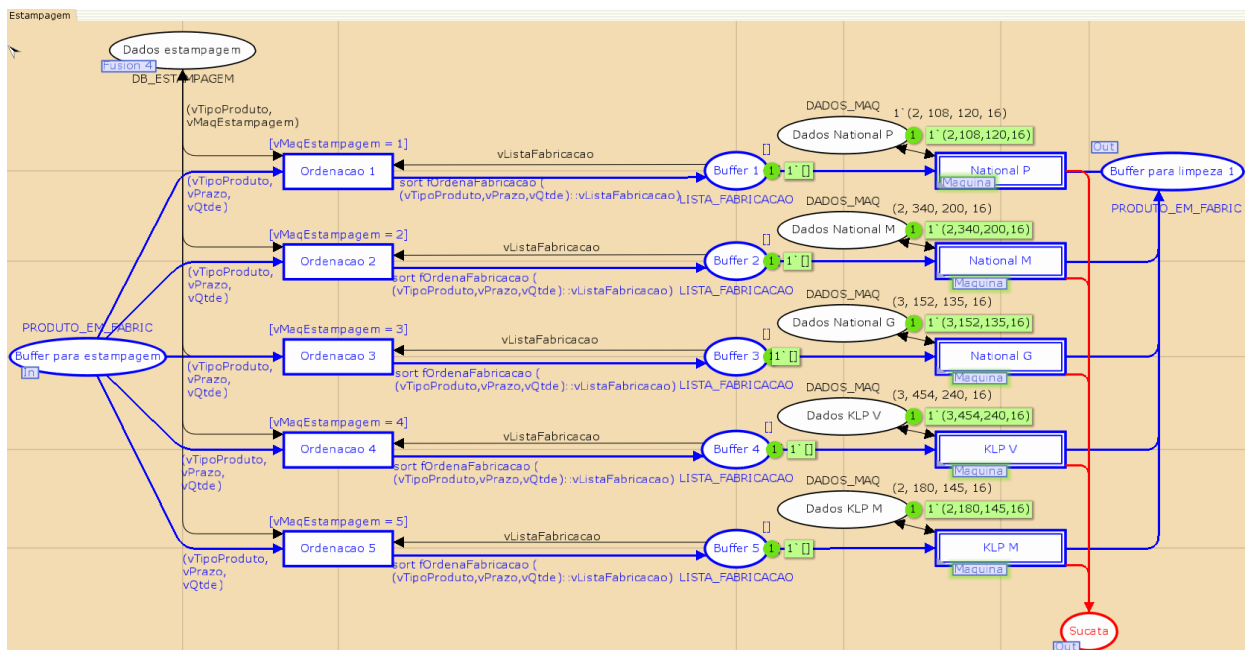
b.3.3) Entrada de matéria-prima



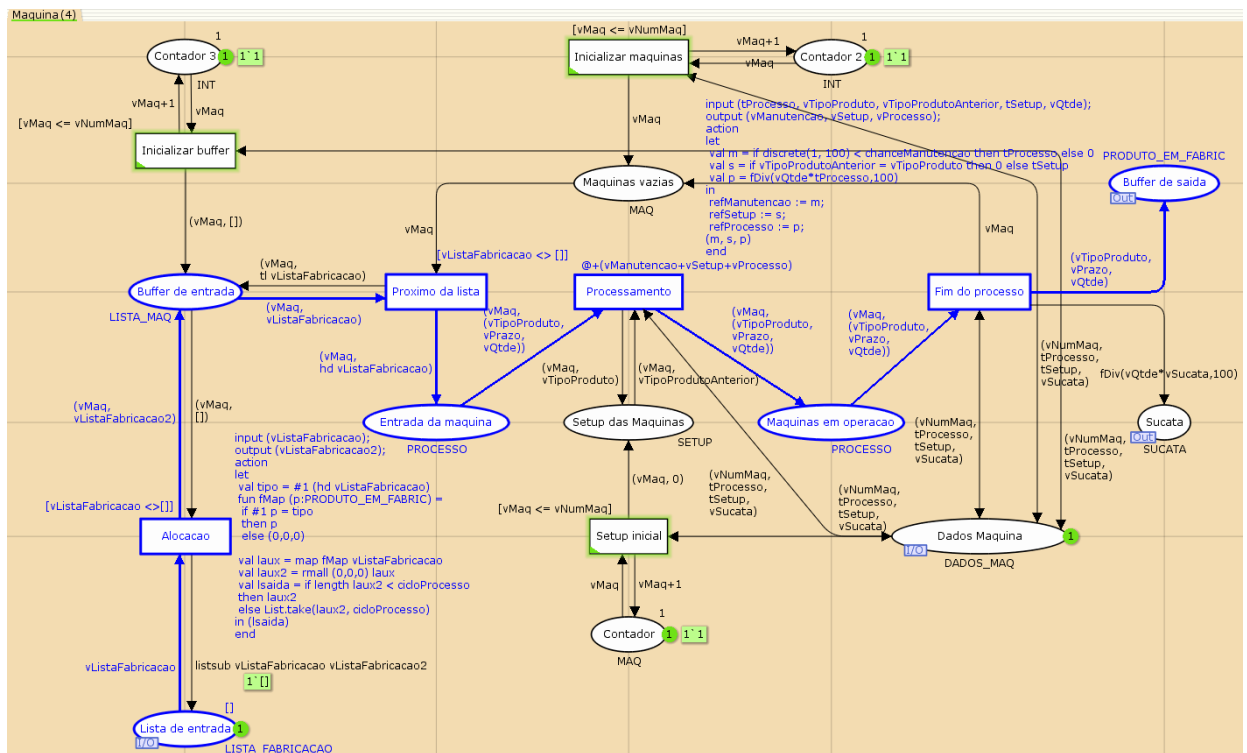
b.3.4) Emissão de pedidos de matéria-prima

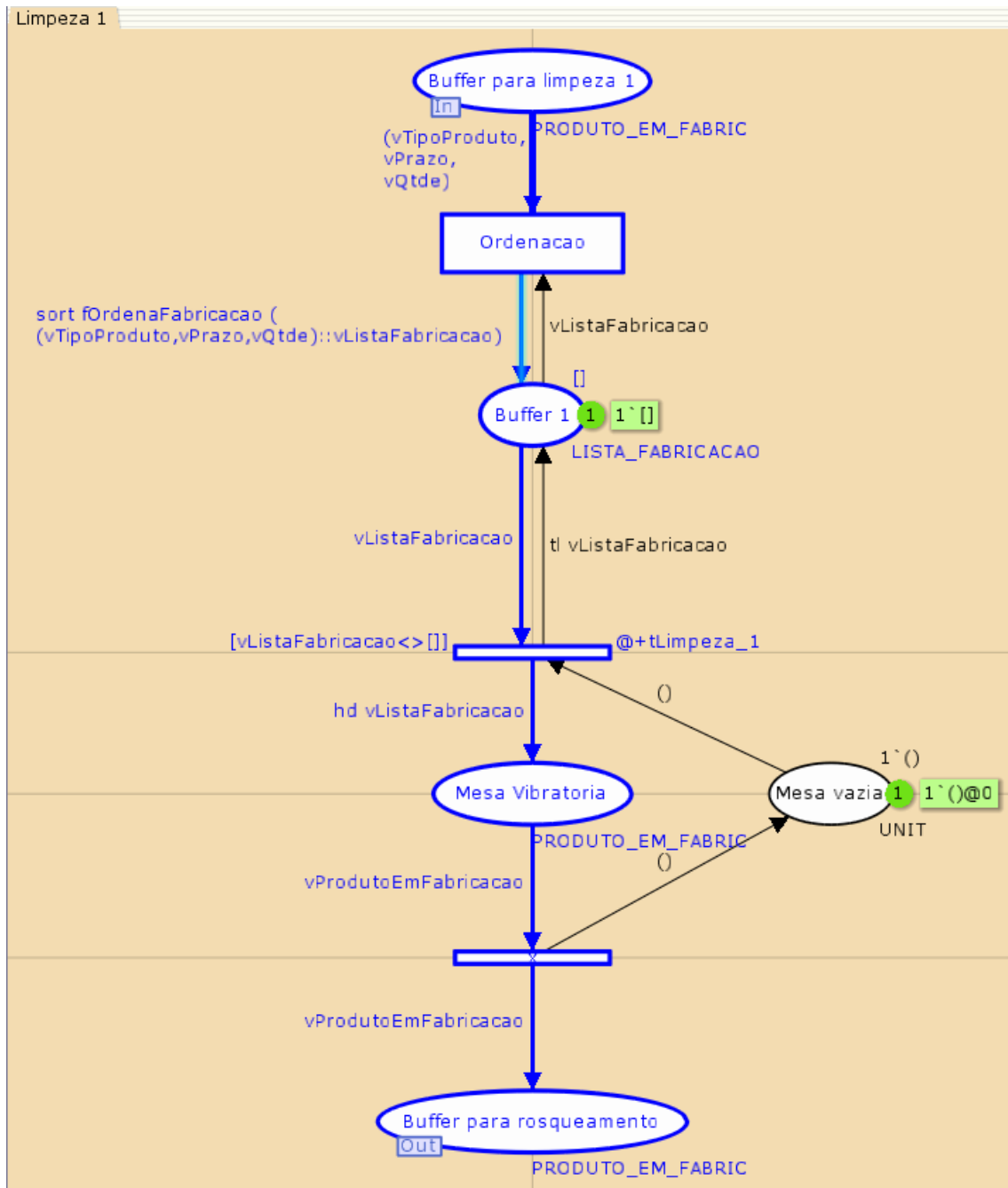


b.3.5) Estampagem

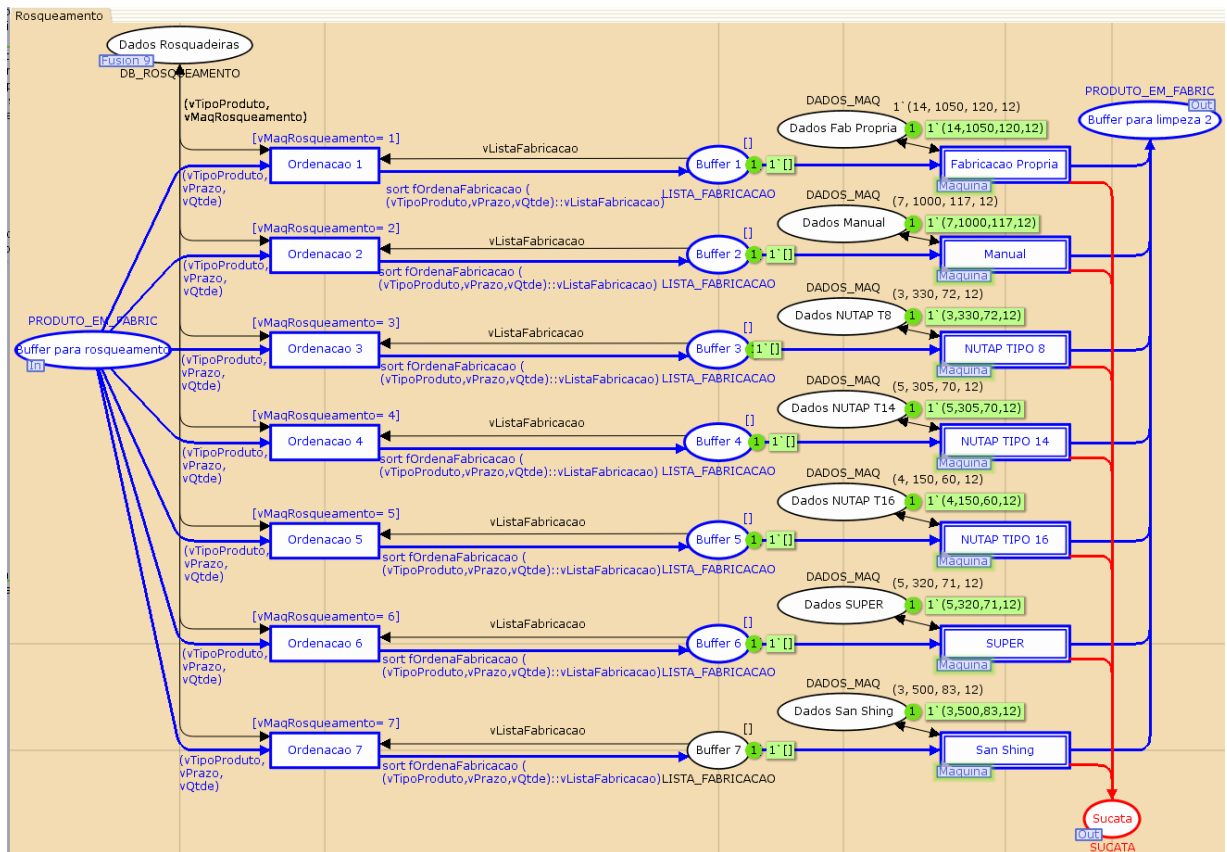


b.3.6) Máquina

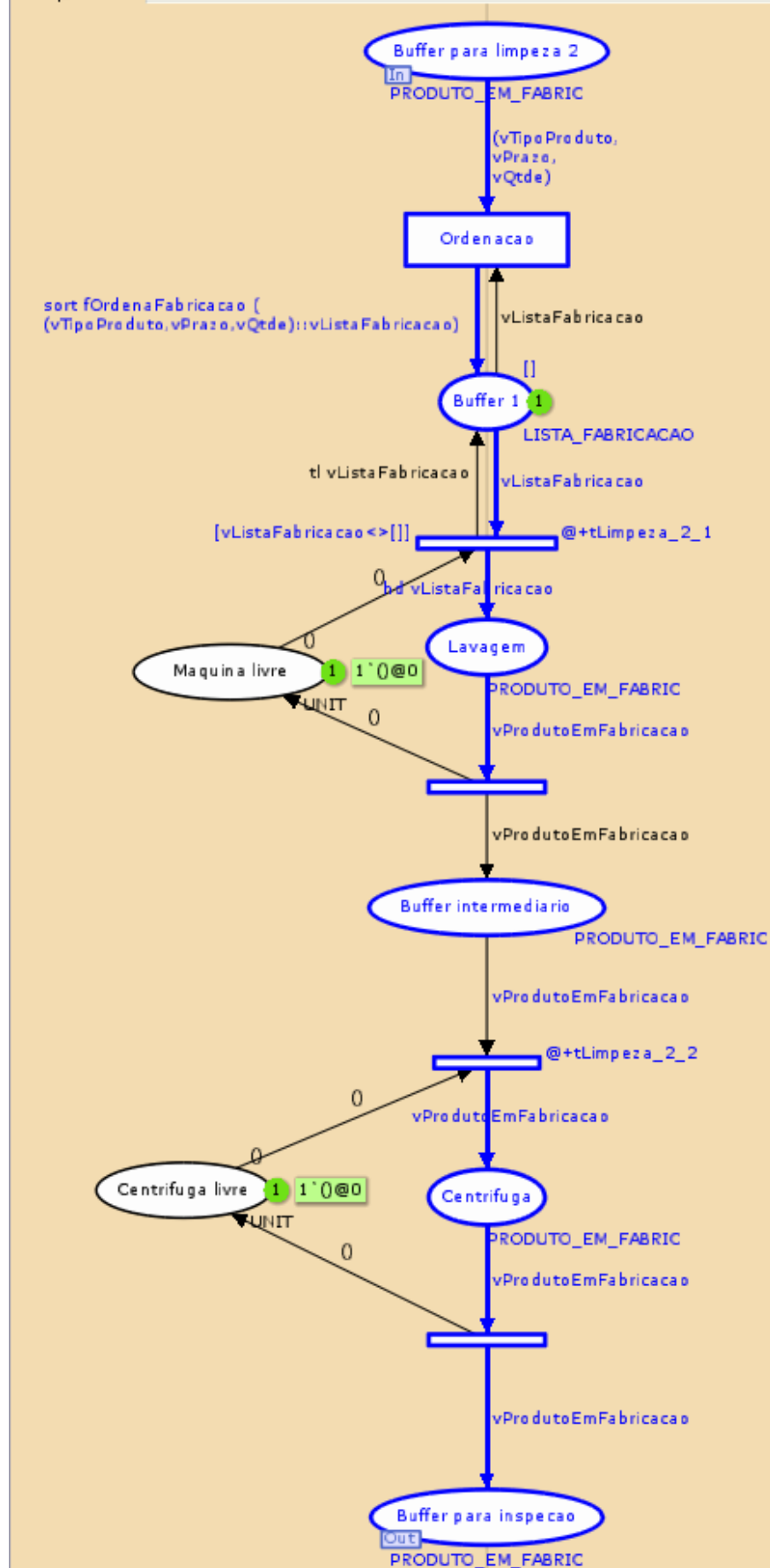




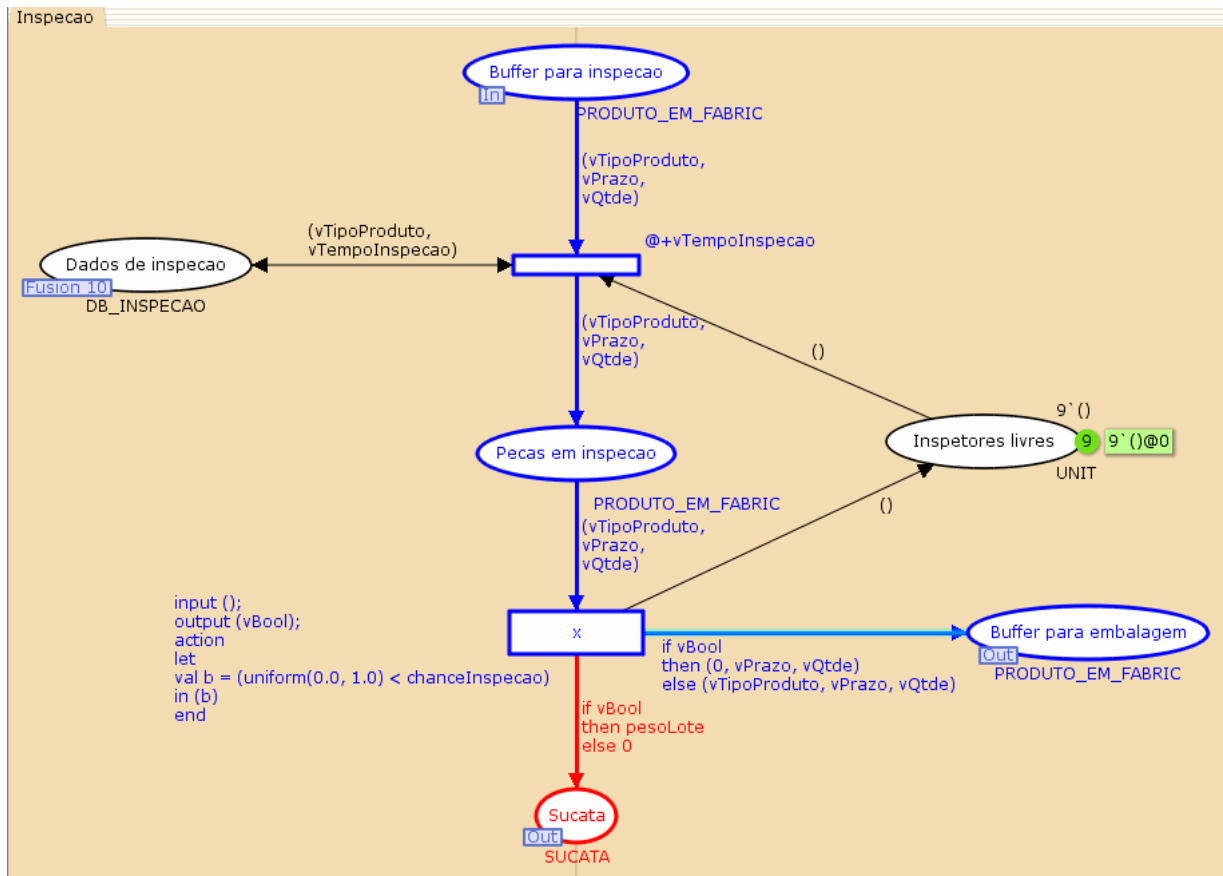
b.3.8) Rosqueamento



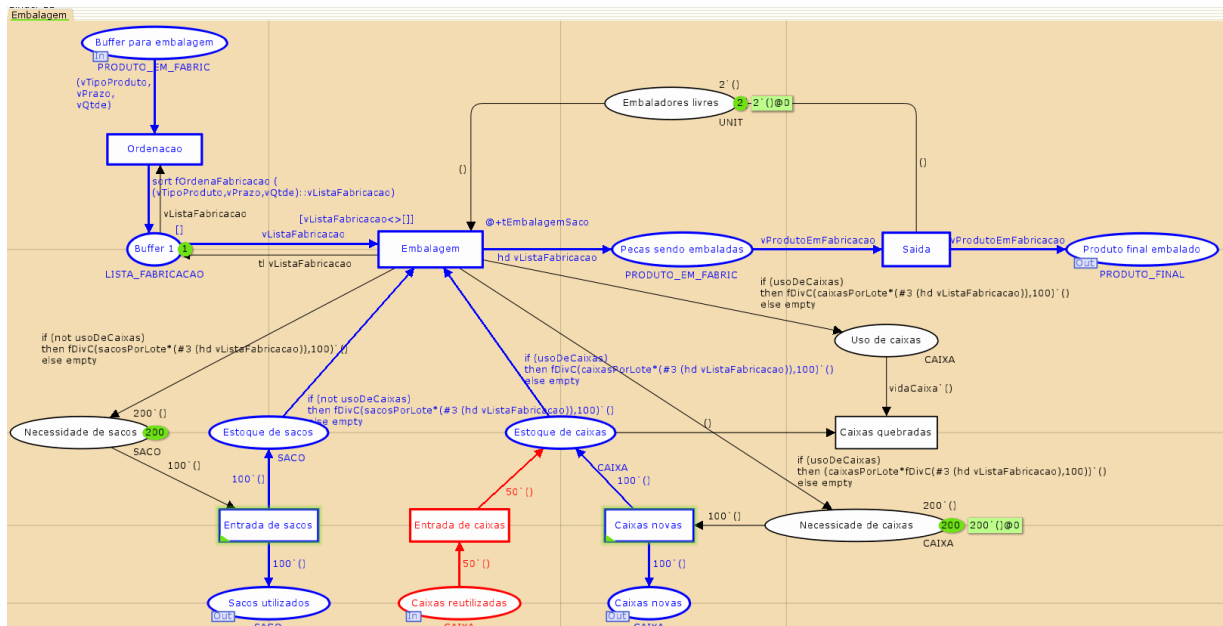
b.3.9) Limpeza após o rosqueamento



b.3.10) Inspeção



b.3.11) Embalagens



4.1.6. Importação de dados externos

a) Tabela de Produtos

TIPO_PRODUTO	Matéria prima (diâmetro da bitola)	Tamanho do lote (porcas)	Estampadeira	Rosqueadeira	Tempo de inspeção (min)	Mínimo de pedidos (porcas)	Máximo de pedidos (porcas)	Prazo (dias úteis)	Modo de entrega
1	22 mm	8.000	National G	San Shing	190	80.000	120.000	19	Diária
2	22 mm	8.000	National G	Manual	220	80.000	100.000	15	Diária
3	20 mm	12.000	KLP V	NUTAP Tipo 16	180	60.000	100.000	14	Diária
4	16 mm	30.000	National P	Manual	220	220.000	240.000	20	Unica
5	14 mm	40.000	KLP V	NUTAP Tipo 14	230	1.000.000	2.600.000	42	Diária
6	18 mm	20.000	KLP M	NUTAP Tipo 14	130	870.000	1.170.000	40	Diária
7	10 mm	80.000	KLP M	SUPER	220	300.000	400.000	30	Unica
8	10 mm	85.000	National M	SUPER	220	40.000	60.000	10	Unica
9	12 mm	79.000	National M	SUPER	230	56.000	84.000	12	Unica
10	10 mm	74.000	National M	SUPER	230	72.000	108.000	16	Unica
11	12 mm	69.000	National P	NUTAP Tipo 8	210	96.000	144.000	21	Unica
12	10 mm	64.000	National P	NUTAP Tipo 8	180	128.000	192.000	23	Unica
13	12 mm	59.000	National P	NUTAP Tipo 8	180	168.000	252.000	26	Unica
14	10 mm	54.000	National G	NUTAP Tipo 8	230	232.000	348.000	28	Semanal
15	12 mm	49.000	National P	NUTAP Tipo 8	240	400.000	600.000	31	Unica
16	10 mm	45.000	National P	NUTAP Tipo 8	220	408.000	612.000	34	Semanal
17	14 mm	41.000	National M	Fabricacao Propria	170	712.000	1.068.000	36	Semanal
18	16 mm	37.000	KLP M	Fabricacao Propria	210	736.000	1.104.000	38	Semanal
19	12 mm	33.000	National G	Fabricacao Propria	240	984.000	1.476.000	41	Diária
20	16 mm	29.000	National P	SUPER	200	896.000	1.344.000	39	Diária
21	14 mm	26.000	National P	Fabricacao Propria	210	616.000	924.000	37	Semanal
22	18 mm	23.000	National M	NUTAP Tipo 16	140	408.000	612.000	35	Semanal
23	20 mm	20.000	National P	NUTAP Tipo 16	220	304.000	456.000	32	Semanal
24	22 mm	17.000	National G	NUTAP Tipo 16	140	232.000	348.000	29	Semanal
25	18 mm	15.000	National G	NUTAP Tipo 16	220	168.000	252.000	27	Semanal
26	20 mm	13.000	National G	NUTAP Tipo 16	130	128.000	192.000	24	Semanal
27	22 mm	11.000	National G	San Shing	130	96.000	144.000	22	Semanal
28	18 mm	9.000	KLP M	San Shing	240	72.000	108.000	18	Diária
29	20 mm	7.000	National G	Manual	220	56.000	84.000	13	Diária
30	22 mm	5.000	National G	San Shing	160	40.000	60.000	11	Semanal

b) Tabelas de matérias-primas:

TIPO_MAT_PRIMA	Diâmetro
1	10 mm
2	12 mm
3	14 mm
4	16 mm
5	18 mm
6	20 mm
7	22 mm

Uso médio (lotes)	Uso médio (carretéis)	Materia prima inicial	Estoque Ideal
25,4	2,97	10.000	25.000
53,7	6,27	21.000	53.000
96,3	11,26	38.000	96.000
71,2	8,32	28.000	71.000
97,2	11,36	39.000	97.000
48,0	5,61	19.000	48.000
61,7	7,21	25.000	61.000

c) Tabelas de estampadeiras:

MAQ_ESTAMPAGEM	Nome	Quantidade	Tempo de processamento (min)	Tempo de setup (min)	Sucata por lote (kg)
1	National P	2	108	120	16
2	National M	2	340	200	16
3	National G	3	152	135	16
4	KLP V	3	454	240	16
5	KLP M	2	180	145	16

d) Tabelas das rosqueadeiras:

MAQ_ROSQUEAMENTO	Nome	Quantidade	Tempo de processamento (min)	Tempo de setup (min)	Sucata por lote (kg)
1	Fabricacao Propria	14	1050	120	12
2	Manual	7	1000	117	12
3	NUTAP Tipo 8	3	330	72	12
4	NUTAP Tipo 14	5	305	70	12
5	NUTAP Tipo 16	4	150	60	12
6	SUPER	5	320	71	12
7	San Shing	3	500	83	12