

**Vitor Luiz da Silva Pereira**

**Modelagem e Análise do Processo de Produção de uma Indústria  
de Bens de Consumo**

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo relacionada à disciplina  
PMR2550 – Projeto de Conclusão de  
Curso II, do Departamento de  
Engenharia e de Sistemas Mecânicos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

22 de novembro de 2010

**Pereira, Vitor Luiz da Silva**

**Modelagem e análise do sistema de produção de uma indústria de bens de consumo / V.L.S. Pereira. -- São Paulo, 2010. 57 p.**

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

**1. Sistemas de produção 2. Sistemas discretos 3. Redes de Petri I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.**

## **Resumo**

O processo de produção é a atividade central de uma indústria de bens de consumo. É através dela que se obtém o produto final, sendo que um processo ineficiente prejudica em grande escala os resultados globais da indústria. Com isso em vista, o objetivo aqui é a modelagem e análise de processos de produção em uma indústria de bens de consumo. Os sistemas produtivos são delimitados e quantificados, sendo abordados do ponto de vista de sistemas a eventos discretos. Em sua modelagem, os processos são descritos por modelos interpretados de rede de Petri e a validação destes modelos é realizada com base na comparação dos resultados obtidos com duas ferramentas distintas de simulação: HPSim e Promodel. Além da análise estrutural do sistema e dos processos, o trabalho envolve a análise funcional e de desempenho, de onde sugestões de melhorias são derivadas. Como estudo de caso, considera-se uma das plantas de produção da empresa “Procter & Gamble do Brasil S/A”.

**Palavras chave:** Sistema de produção, Sistema a eventos discretos, Rede de Petri

# Sumário

---

<b>Resumo.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>6</b>
1.1. Objetivos .....	6
1.2. Organização do Texto .....	7
<b>2. Fundamentos .....</b>	<b>8</b>
2.1. Sistemas de Produção .....	8
2.1.1. Trabalho .....	8
2.1.2. Matéria-prima .....	9
2.1.3. Instrumentos de produção .....	9
2.2. Sistema de Produção de Sabão em Pó .....	10
2.2.1. Spray Drying .....	10
2.2.2. Dry Mixing .....	11
2.3. Sistemas a Eventos Discretos.....	11
2.4. Rede de Petri .....	13
2.4.1. Funcionamento de uma rede de Petri .....	13
2.5. PFS / MFG .....	14
2.5.1. PFS .....	14
2.5.2. MFG .....	15
2.6. Software de Simulação Discreta .....	17
2.6.1. ProModel .....	17
2.6.2. HPSim .....	18
2.7. Adição de Valor .....	18
2.7.1. Classificação das atividades .....	19
2.7.2. Perdas de produção .....	20

<b>3.</b>	<b>Especificação e Modelagem .....</b>	<b>21</b>
3.1.	Planejamento do Projeto .....	21
3.1.1.	Estudo preliminar .....	22
3.1.2.	Especificação do sistema .....	22
3.1.3.	Modelo conceitual (PFS) .....	23
3.1.4.	Modelo detalhado (MFG) .....	23
3.1.5.	Análise estrutural e qualitativa dos processos.....	23
3.1.6.	Coleta de dados específicos para validação dos modelos .....	23
3.1.7.	Modelo para simulação (HPSim e Promodel).....	24
3.1.8.	Simulação e validação do modelo .....	24
3.1.9.	Análise funcional e quantitativa dos processos .....	24
3.2.	Estudo preliminar do sistema de produção .....	24
3.3.	Especificação do Sistema .....	27
3.4.	Modelo conceitual (PFS) .....	29
3.5.	Modelo detalhado (MFG) .....	29
3.5.1.	Atividade [mistura (crutcher)].....	30
3.5.2.	Atividade [pós-adição (base branca I)] .....	31
3.5.3.	Atividade [pós-adição (base branca II)] .....	32
3.5.4.	Atividade [armazenagem].....	34
3.5.5.	Atividade [embalagem].....	35
3.6.	Análise Estrutural e Qualitativa dos Processos.....	37
<b>4.</b>	<b>Simulação.....</b>	<b>38</b>
4.1.	Informações Específicas .....	38
4.2.	Simulação em HPSim .....	39
4.2.1.	Testes e Resultados – HPSim.....	41
4.3.	Simulação no ProModel .....	44
4.3.1.	Testes e Resultados – ProModel .....	45

4.4.	Otimização do Sistema .....	47
4.4.1.	Descarregamento no piso de armazenagem.....	47
4.4.2.	Processo de Pós-Adição .....	49
4.4.3.	Linhas de embalagens por cartuchos.....	51
5.	<b>Conclusão .....</b>	<b>54</b>
6.	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>55</b>

## **1. Introdução**

O objetivo do processo de produção é a criação de bens e serviços visando atender às necessidades e desejos de clientes. Este objetivo é considerado atingido se a empresa produzir o número adequado de produtos, no menor tempo possível, com a melhor qualidade e mantendo tudo a um custo acessível (Oliveira, 1998).

É necessário, assim, conceber e manter um sistema produtivo com um nível alto de eficiência e que minimize a quantidade de atividades que não agregam valor ao produto final.

Sendo a etapa de produção a parte principal de uma indústria de bens de consumo, o presente trabalho busca estudar sua eficiência, explorando métodos de modelagem e análise de sistemas a eventos discretos (SEDs) (Miyagi, 1996).

A “Procter & Gamble do Brasil S/A” (P&G) é uma empresa que se mostrou disposta a compartilhar informações, sendo utilizada como estudo de caso para esse projeto. Ela é considerada atualmente uma grande empresa multinacional, atuante no setor de bens de consumo. O processo aqui considerado é referente à fabricação de sabão em pó.

Embora algumas etapas do processo produtivo de sabão em pó possam não ser adequadas para a modelagem com SED, a maior parte delas é. Assim, o sistema é devidamente delimitado e suas etapas adequadamente separadas e definidas. Existem atualmente várias técnicas de modelagem e análise de sistemas, sendo que são empregadas aqui técnicas derivadas de rede de Petri, assim como são utilizados softwares de simulação discreta.

### **1.1. Objetivos**

Este trabalho contribui para o aprimoramento de sistemas produtivos através da modelagem e análise de desempenho destes como sistemas a eventos discretos (SEDs). O objetivo específico é modelar um sistema de produção de sabão em pó, considerando este sistema como SED através da aplicação de técnicas derivadas de rede de Petri e validar estes modelos usando os softwares Hpsim (Kim, 2009) e ProModel (Promodel Optimization Software Suite, 2010). Com os modelos validados

estes mesmos softwares são usados para analisar o processo atual e desenvolver propostas de melhorias.

## **1.2. Organização do Texto**

No capítulo 2 encontram-se os conceitos básicos relacionados a processos de produção, ao processo de fabricação de sabão em pó e, em maior parte, a modelagem e análise de SED.

O capítulo 3 apresenta a especificação do projeto (seu planejamento), assim como o desenvolvimento dos modelos, em PFS e MFG (Miyagi, 1996).

No capítulo 4 são mostrados os resultados das simulações e análises estruturais, qualitativas, funcionais e quantitativas do sistema. Também são apresentados aperfeiçoamentos do processo de produção.

Ao capítulo 5 reservam-se as conclusões do projeto.



## 2. Fundamentos

Este capítulo se dedica a explicar os conceitos básicos considerados no desenvolvimento do trabalho. O texto é estruturado partindo de conceitos básicos sobre sistemas de produção, em seguida conceitos específicos sobre a produção de sabão em pó para, finalmente, as teorias sobre sistema a eventos discretos, rede de Petri, PFS/MFG e simulação.

### 2.1. Sistemas de Produção

Um sistema pode ser definido como um grupo de objetos que estão agregados de acordo com uma relação de interdependência para atingir certos objetivos (Miyagi, 1996). Para um sistema de produção, o objetivo é a transformação de recursos (por exemplo, matéria-prima, energia, etc.) para criar bens de consumo, que, por sua vez, visam satisfazer as necessidades do homem.

Esta transformação é realizada através de processos de produção, dentro da definição de processos de produção podem-se identificar três elementos associados: trabalho, matéria-prima, e instrumentos de produção (Oliveira, 1998).

#### 2.1.1. *Trabalho*

É toda a atividade desenvolvida pelo homem, seja ela física ou mental, da qual resultam bens e serviços (Oliveira, 1998). De acordo com sua execução, o trabalho pode ser classificado como:

Trabalho qualificado: necessita de certo grau de conhecimento especializado para ser realizado;

Trabalho não qualificado: pode ser feito sem nenhum conhecimento especializado;

Por exemplo, no sistema de produção de sabão em pó podem ser classificadas como trabalho: a operação do maquinário, a elaboração de fórmulas, o transporte de material, a manutenção, etc.

### 2.1.2. **Matéria-prima**

São todos os recursos que são transformados, durante o processo de produção, para constituírem o produto final.

Por exemplo, para o sabão em pó são utilizadas matérias primas, como: soda cáustica, sulfato de sódio, silicato de sódio, perfumes e materiais de embalagem, como papel e plásticos.

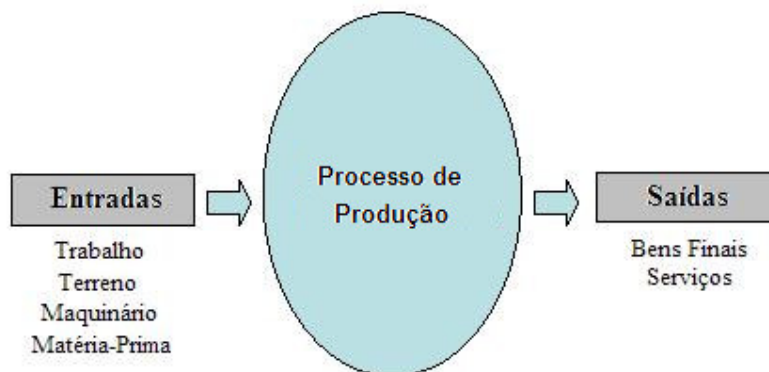
### 2.1.3. **Instrumentos de produção**

São todas as ferramentas, dispositivos, máquinas, equipamentos e instalações que, direta ou indiretamente, são de alguma forma utilizadas para transformar a matéria-prima no produto final.

Por exemplo, na indústria do sabão em pó, os instrumentos de produção são todas as máquinas envolvidas no processo de fabricação e de embalagem do produto final.

Outra classificação divide o sistema de produção em três partes diferentes: entradas, processo de produção e saídas (adaptado de Hammer & Champy's, 1993).

As entradas representam as matérias-primas do processo e a saída representa o produto acabado. O processo de produção envolve todas as atividades que atuam na transformação das matérias-primas no produto acabado.



**Figura 1. Processo de produção**

Da classificação dos elementos associados ao processo de produção, o trabalho e os instrumentos de produção estariam dentro do processo de produção.

O processo de produção representa, assim, o objeto de análise do presente trabalho.

## 2.2. Sistema de Produção de Sabão em Pó

Atualmente o termo “sabões em pó” é usado para um tipo de detergente e não para um tipo de sabão. Suas principais matérias-primas são hidrocarbonetos derivados do petróleo, ácido sulfúrico e uma substância tensoativa, responsável pela superfície ativa da molécula do detergente. O sabão, por outro lado, utiliza sebo ou óleo vegetal juntamente com um agente alcalino como matérias-primas (SDA, 1981).

Além das matérias-primas principais, os detergentes ainda são compostos por diversos materiais auxiliares. Alguns exemplos são: *builders*<sup>1</sup>, inibidores de corrosão, agentes para branqueamento, enzimas, substâncias amaciantes, fragrâncias e corantes. (SDA, 1981)

Na fabricação de detergentes diversos processos podem ser usados dependendo da forma física do produto final. No caso do sabão em pó (detergente seco) os dois processos mais utilizados são a mistura e secagem por *spray* (*spray drying*) e a mistura seca (*dry mixing*), sendo que a grande maioria desses detergentes é produzida pelo *spray drying*. (SDA, 1981)

### 2.2.1. *Spray Drying*

Nesse processo ingredientes líquidos e sólidos são misturados em um equipamento chamado *crutcher*. Durante a mistura tanto a temperatura como a umidade são ajustadas para assegurar ao produto final as propriedades desejadas (SDA, 1981)

A mistura resultante, que possui uma densidade relativamente alta é bombeada para o topo de uma torre de secagem por *spray*. Ela é, então,

---

<sup>1</sup> *Builders* são materiais utilizados para reduzir o teor de íons de cálcio e magnésio da água, substâncias que prejudicam o desempenho do sabão.

expelida através de orifícios sob uma alta pressão. O material cai através de uma corrente de ar quente e acaba por formar grânulos ao secar (SDA, 1981).

O pó obtido é resfriado e as substâncias sensíveis ao calor, como fragrâncias e corantes, são adicionados para formar o produto final (SDA, 1981).

### 2.2.2. *Dry Mixing*

Esse processo é apropriado para quando as matérias-primas envolvidas não contém água. Nele os materiais são agregados em um produto uniforme, não sendo necessário um processo de secagem (SDA, 1981).

Nos dois processos apresentados o produto resultante é o sabão em sua forma bruta, sem substâncias como fragrâncias, corantes e enzimas. Essas substâncias não são essenciais em termos de desempenho como sabão, mas possuem grande importância para a viabilidade comercial do produto (SDA, 1981).

Para uma indústria com tipos diferentes de sabão é vantajoso criar uma base conjunta para todos os seus produtos. Esta base é chamada de “base branca”. Desta forma, os materiais responsáveis pela diferenciação de cada sabão entram na mistura pelo processo de pós-adição (SDA, 1981).

Neste processo de pós-adição, substâncias são adicionadas à base branca e o conjunto é misturado novamente (*reblender*), produzindo, assim, o produto final a ser embalado e comercializado. Entre as substâncias que entram na pós-adição se encontram: corantes, fragrâncias, enzimas, etc (SDA, 1981).

## 2.3. Sistemas a Eventos Discretos

Sistemas a eventos discretos (SEDs) são sistemas dinâmicos em que as variáveis de estado estão no domínio de valores finitos ou enumeráveis que evoluem ao longo do tempo de forma assíncrona e abrupta, ou seja, a sua dinâmica é governada pela ocorrência de eventos instantâneos que alteram o estado discreto do sistema (Miyagi, 1996).

Modelos e análises de sistemas baseados na visão destes como SED são utilizadas para entender e aperfeiçoar processos em ambiente industrial. A visão de um sistema como SED permite investigar a estrutura e a dinâmica de cada uma de suas partes, verificando quais funções elas exercem e qual a relação entre elas. Esse entendimento possibilita a otimização do processo como um todo.

Com esse objetivo diversos trabalhos têm sido conduzidos para a modelagem e análise de sistemas vistos como SED. Dentre os trabalhos existentes, o procedimento PFS/MFG de modelagem, análise e controle (Miyagi, 1996), é um dos que assegura um tratamento sistematizado e próprio para a concepção e desenvolvimento de modelos destes sistemas. Este procedimento é derivado da técnica de refinamentos sucessivos da rede de Petri (Peterson, 1981) e explora o poder de representação desta técnica através de interpretações como o PFS (*Production Flow Schema*) e o MFG (*Mark Flow Graph*) para descrever o sistema em diferentes níveis de abstração (Ino, 2005).

Este procedimento se utiliza da simulação, junto com a modelagem, para realizar a análise do sistema. A simulação ajuda a encontrar erros de projeto, gargalos e atividades super ou sub-dimensionadas, possibilitando encontrar as melhores condições de operação do sistema antes de implementá-lo no ambiente industrial.

Dentro da análise por simulação, outro método de estudo de SED que se destaca é o uso de softwares de simulação discreta. Neste contexto, o Promodel é uma ferramenta amplamente utilizada no mercado, ela permite uma análise detalhada das diversas relações presentes no sistema e dos resultados que cada mudança irá gerar. O software HPSim, por sua vez, permite a construção e simulação de modelos em rede de Petri. (Kim, 2009)

No presente projeto a validação de modelos desenvolvida com o procedimento PFS/MFG será conduzida pelo estudo comparativo de dados de simulação obtidos com os softwares HPSim e ProModel.

Mais detalhes, sobre SEDs, podem ser encontrados em Peterson (1981) e Miyagi (1996).

## 2.4. Rede de Petri

A rede de Petri é um formalismo para a modelagem de SEDs com grande poder de expressividade, permitindo representar com facilidade todas as relações de causalidade entre processos em situações de: seqüencialidade, conflito, concorrência e sincronização. Ela é também uma ferramenta gráfica e matemática de modelagem que oferece um ambiente uniforme para descrição, análise e projeto de SEDs (Miyagi, 1996).

### 2.4.1. *Funcionamento de uma rede de Petri*

Uma rede de Petri consiste de *lugares*, *transições* e *arcos orientados*. Os *arcos* ligam os *lugares* e as *transições* em um único sentido.

Os *lugares* de onde saem *arcos*, orientados para uma *transição*, são chamados de entradas da *transição*; os *lugares* para onde os *arcos* são orientados, saídos de uma *transição*, são chamados de saídas da *transição*.

Cada *lugar* pode conter um número inteiro, maior ou igual a zero, de *marcas*<sup>2</sup>. Uma *transição* pode ser disparada quando existe pelo menos uma *marca* em cada uma das entradas da *transição*; quando disparada ela consome as *marcas* dos *lugares* de entrada e cria *marcas* nos *lugares* de saída. O disparo de uma *transição* ocorre em um passo único, isto é, não pode ser dividido.

Os disparos das *transições* de uma rede de Petri ocorrem de forma não determinística, ou seja, quando várias *transições* estão habilitadas para disparo ao mesmo tempo, qualquer uma delas pode disparar.

Como a evolução dos estados na rede de Petri não é determinística e inúmeras *marcas* podem estar presentes em qualquer *lugar*, a rede de Petri é uma técnica adequada para modelar a dinâmica dos processos produtivos de um sistema de produção visto como SED.

Mais detalhes, sobre a rede de Petri, podem ser encontrados em Peterson (1981).

---

<sup>2</sup> Este tipo de rede de Petri é definida como rede *Lugar/Transição*

## 2.5. PFS / MFG

O formalismo matemático da rede de Petri possibilita a análise do modelo e verificações de propriedades inerentes aos SEDs. Entretanto, em aplicações práticas de projeto e controle de sistemas complexos e de grande porte, a técnica apresenta limitações devido às dimensões do grafo resultante (Ino, 2005).

Para superar essas limitações, têm sido desenvolvidas extensões derivadas da rede de Petri. Um exemplo é o PFS/MFG que, baseado nas características funcionais dos SED e nas especificações de controle de um sistema de produção, buscam modelar gradualmente suas atividades em uma abordagem *top-down* (Miyagi, 1996).

Inicialmente é construído o modelo conceitual através do PFS (*Production Flow Schema*). Esse passo representa uma interpretação abstrata do sistema, onde a ênfase está na identificação dos componentes ativos e passivos, assim como na caracterização do fluxo de material e de informação entre eles.

A partir do modelo inicial os elementos do PFS são detalhados, gerando sub-grafos que podem ser em PFS ou em MFG (*Mark Flow Graph*) de acordo com o que for necessário para representar o sistema.

Para a modelagem do comportamento dinâmico do sistema o modelo PFS evolui gradativamente para um modelo MFG, ou alguma outra interpretação da rede de Petri adequada para detalhar o comportamento dinâmico do sistema no nível desejado. A partir deste ponto a dinâmica do sistema é descrita através da evolução da *marcação* do grafo.

### 2.5.1. PFS

Na primeira etapa da modelagem divide-se o sistema em um certo número de partes discretas, pois a identificação destas partes deve facilitar a compreensão do sistema. Estas partes são divididas em componentes passivos do sistema, representados por círculos, e componentes ativos, representados por retângulos. Os componentes são conectados por *arcos orientados*, que designam as relações entre os componentes do sistema (Matsusaki, 1998).

- Elementos ativos (atividades): capazes de modificar os itens-objetos do processo produtivo (representados por dois colchetes).
- Elementos passivos (distribuidores ou interatividades): não realizam modificações, mas são capazes de armazenar, transportar e distribuir os itens (representados por círculos).

As relações entre estes elementos são representadas por *arcos orientados*. Estes indicam uma conexão lógica e/ou física e/ou direitos de acessos entre dois elementos. Um *arco* nunca representa um componente do sistema, mas uma relação entre os componentes (Matsusaki, 1998).

O grafo resultante da interligação dos elementos acima é chamado de PFS. É importante ressaltar que no PFS não existe o conceito de *marcas*, isto é, não existe a representação dinâmica do sistema.

Maiores detalhes sobre PFS podem ser encontradas em Miyagi (1996).

#### 2.5.2. **MFG**

O procedimento PFS/MFG está baseada no refinamento gradativo do PFS, substituindo-se uma *atividade* ou um distribuidor por um PFS ou MFG ou uma rede híbrida PFS/MFG com elementos de ambos os tipos de rede (Matsusaki, 1998).

Os seguintes elementos estruturais compõem um MFG (Hasegawa, 1982):

- *Box*: indica uma condição e é representado por um bloco quadrado.
- *Transição*: indica um evento e é representada por uma barra vertical.
- *Arco Orientado*: conecta *boxes* e *transições* para indicar a relação entre uma condição e os pré e pós-eventos que o definem. É representado por uma seta.
- *Marca*: indica a manutenção de uma condição e é representada por um ponto negro no interior do *box* correspondente à condição mantida.



- *Porta* ou *gate*: habilita ou inibe a ocorrência dos eventos correspondentes ao disparo das *transições*. Os *gates* podem ser *habilitadores*, representados por um arco terminado em um círculo negro, ou *inibidores*, representados por um arco terminado em um círculo branco. Quanto à origem do sinal, os *gates* podem ser classificados em *internos*, cujos sinais se originam em um *box* do grafo, ou *externos*, cujos sinais provêm de um ente externo ao grafo. Seu sinal é binário, isto é, quando o sinal do *gate habilitador* for “1”, a *transição* conectada a este *gate* é habilitada.
- *Arco de sinal de saída*: envia um sinal binário do *box* para um dispositivo externo ao grafo e é representada por uma linha conectando o *box* de origem ao dispositivo.

Tanto as *transições* quanto os *boxes* podem ter um número ilimitado de *arcos* de entrada ou saída, mas entre uma *transição* e um *box* só pode existir um único *arco*. Da mesma maneira, entre uma *transição* e uma fonte de sinal externo só pode existir um *gate*.

A disposição das *marcas* no grafo define um estado do sistema. A evolução entre os diversos estados ocorre através do disparo das *transições* e da conseqüente distribuição das *marcas*.

Uma *transição* está habilitada para ser disparada se todas as seguintes condições são satisfeitas:

- Não existe *box* com *marcas* no lado de saída.
- Não existe *box* sem *marcas* no lado de entrada.
- Não existe *gate habilitador*, interno ou externo, que esteja no estado desabilitado.
- Não existe *gate inibidor*, interno ou externo, que esteja no estado inibidor.

Assim como em uma rede de Petri várias *transições* concorrentes em conflito podem estar habilitadas ao mesmo tempo, sendo que o disparo de uma dessas *transições* acarreta na desabilitação das outras.

Maiores detalhes sobre MFG podem ser encontradas em Miyagi (1996).

## 2.6. Software de Simulação Discreta

### 2.6.1. *ProModel*

ProModel é um software de simulação discreta utilizado para avaliar, planejar ou desenhar processos de manufatura, armazenagem, logística ou outras atividades industriais. Ele possui uma linguagem e um formato próprios, sendo que um modelo feito em MFG precisa ser adaptado para poder ser simulado por este software (Promodel Optimization Software Suite, 2010)

Dentro da linguagem de modelagem de sistema do ProModel encontra-se os seguintes elementos: (Ino, 2005)

- **Locais:** representam uma localização física na planta do *processo* produtivo, onde é realizado o processamento ou a armazenagem de *entidades*.

- **Entidades:** são os itens que sofrem transformações durante o *processo*. Cada *entidade* representa uma matéria-prima, produto intermediário ou produto final. Ao longo do *processo* produtivo as *entidades* sofrem transformações, gerando novas *entidades*, essas transformações ocorrem através da união, divisão ou conversão de itens.

- **Caminhos:** representam como as *entidades* e *recursos* se movem pelo *processo* produtivo. Um *caminho* é formado por nós conectados por segmentos, cada nó pode possuir interfaces com diversos *locais* do *processo* produtivo. *Caminhos* podem ser compartilhados por diversas *entidades* e *recursos*.

- **Recursos:** podem ser pessoas, ferramentas, veículos ou qualquer outro objeto que seja usado no *processo* produtivo, as atividades desempenhadas pelos *recursos* envolvem: transporte de materiais, operações

de manufatura e manutenção de um *local*. *Recursos* podem ser dinâmicos ou estáticos, sendo o primeiro vinculado a um *caminho* e o segundo não.

- **Processos:** definem a lógica do sistema. Em um *processo* são configurados os tempos de operação e de movimentação, as requisições de *recursos*, as relações entre entradas e saídas de *entidades* e as condições de roteamento: direção que uma *entidade* irá seguir.

- **Chegadas:** é o mecanismo que define as dinâmicas referentes à entrada de *entidades* no sistema. Essas dinâmicas envolvem: frequência de chegada do material, quantidade que chega por vez, *local* de chegada e quantidade total a ser recebida pela fábrica.

- **Atributos:** são variáveis associadas a *entidades* ou *locais*, podem receber um valor inteiro ou um valor real.

#### 2.6.2. **HPSim**

O simulador HPSim (HpetriSim) é uma ferramenta não comercial, construída por Henryk Anschuetz, que permite a construção e simulação de modelos em rede de Petri. Esta ferramenta fornece as funcionalidades básicas necessárias para construir uma rede de Petri, sendo elas: *box*, *transição*, *arco orientado*, *marca* e *gate* (*inibidor* e *habilitador*). (Kim, 2009)

### 2.7. Adição de Valor

Ao olhar para o valor de um produto, uma empresa tem como meta que esse valor ultrapasse seu custo de produção. Dentro do custo de um produto se encontram todos os custos de recursos utilizados para produzi-lo (por exemplo, matérias-primas, trabalho, ferramentas, armazenamento, transporte e despesas gerais) (Hammer & Champy's, 1993).

Nem todas as atividades presentes na cadeia de produção agregam valor ao produto final. Quando o valor do produto após uma atividade é maior do que o valor do produto antes dessa atividade ela é considerada uma atividade que adiciona valor ao produto final (*value-adding activity*). Idealmente o valor adicionado por uma

atividade deve ser maior ou igual aos custos envolvidos em sua realização (Hammer & Champy's, 1993).

Assim, se uma atividade não agrega valor ela representa custos adicionais ao processo, devendo ser evitada para garantir os resultados econômicos da empresa. (Hammer & Champy's, 1993).

### 2.7.1. ***Classificação das atividades***

Dentro do conceito de valor agregado podem-se classificar as atividades produtivas em três tipos:

- Atividades que adicionam valor real ao produto (*real-value-add*, RVA).
- Atividades que adicionam valor ao negócio (*business-value-add*, BVA).
- Atividades que não adicionam valor (*non-value-add*, NVA).

Uma atividade é classificada como RVA se é eficaz. Em outras palavras, se a atividade contribui diretamente para satisfazer as expectativas do cliente. Qualquer atividade que melhora a percepção do cliente em relação ao produto ou serviço é uma atividade RVA. Uma grande parte das atividades de produção são RVA (por exemplo, recebimento de pedidos de clientes, recebimento de materiais, montagem de produtos, etc).

Atividades BVA são as aquelas que preenchem os requisitos do negócio, mas não agregam valor do ponto de vista do cliente, por exemplo, elaboração de relatórios financeiros, manutenção de registros de recursos humanos, etc.

Atividades NVA são atividades que não melhoram a imagem que o cliente tem do produto e não fornece apoio ao negócio. Se a atividade pode ser removida do processo, com nenhum efeito sobre o produto final, é uma atividade NVA. Atividades NVA, também conhecidas como resíduos, muitas vezes, indicam deficiências no processo desenhado. Como exemplos para estes tipos de atividades estão inclusos: armazenagem, transporte, aprovações, re-trabalho, inspeção e o tempo gasto em espera.

Dentro do escopo do presente trabalho as atividades de interesse são as RVA e as NVA. Idealmente o processo produtivo deveria ser formado apenas

por atividades RVA, as atividades NVA, então, representam oportunidades de otimização do processo.

### 2.7.2. ***Perdas de produção***

Alguns indicadores de problemas no processo produtivo, que podem auxiliar no estudo da presença de atividades NVA são:

- O tempo necessário na preparação (*setup*) de uma atividade.
- A quantidade de espaço reservada para armazenagem.
- A distância que deve ser percorrida pelos empregados realizarem suas tarefas.
- O retrabalho presente na atividade.
- O tempo de inatividade não planejado.
- Os valores de eficiência da atividade (tempo de ciclo).

As perdas do processo podem ser eliminadas se a causa raiz puder ser encontrada e corrigida. Por exemplo, em atividades de retrabalho, se erros não ocorressem, não haveria necessidade de corrigi-los.

A meta para a otimização da produção é eliminar as atividades NVA. Quando as atividades NVA não podem ser eliminadas são feitas tentativas para melhorar a eficiência dessas atividades. Assim, ao invés de melhorar a atividade de inspeção para que ela possa ser concluída com mais eficiência, o ideal seria que o processo fosse re-projetado para eliminar a necessidade de inspecionar o produto, entretanto, na presença de atividades de transporte que são intrínsecas ao processo o que se deseja é assegurar a movimentação otimizada do material envolvido.

### **3. Especificação e Modelagem**

#### **3.1. Planejamento do Projeto**

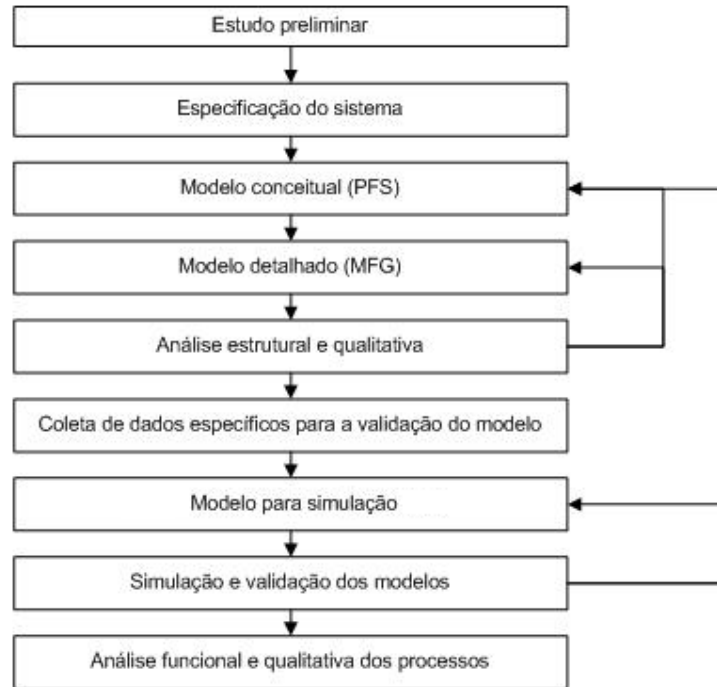
Plano de projeto é um documento formal, usado para guiar tanto a execução do projeto quanto o controle de seu progresso. Seus principais usos são para a documentação de hipóteses e decisões de planejamento, para facilitar a comunicação entre as partes interessadas, e para documentar o escopo, custo e cronograma aprovados. Um plano de projeto pode ser resumido ou detalhado (PMBOK, 1996).

Elaborar um plano e seguir uma metodologia de projeto é essencial para garantir seus resultados finais, evitando imprevistos. Para o presente trabalho foi estabelecido um plano de projeto, que define as etapas, as partes envolvidas em cada etapa e o cronograma de projeto.

Para o desenvolvimento do projeto foram definidas as seguintes etapas principais:

- Estudo preliminar
- Especificação do sistema
- Modelo conceitual (PFS)
- Modelo detalhado (MFG)
- Análise estrutural e qualitativa dos processos
- Coleta de dados específicos para a validação dos modelos
- Modelo para simulação (HPSim e Promodel)
- Simulação e validação do modelo (HPSim e Promodel)
- Análise funcional e quantitativa dos processos

A seguir se encontra uma descrição de cada etapa, assim como as atividades envolvidas em cada uma delas. A Figura 2 representa o relacionamento entre as etapas. O cronograma pode ser encontrado no Anexo I.



**Figura 2. Etapas do projeto**

### 3.1.1. ***Estudo preliminar***

Escopo: entender o funcionamento e a amplitude do sistema de produção em estudo, esta etapa visa coletar informações básicas relacionadas à dinâmica do sistema, as variáveis envolvidas e suas respectivas grandezas e dimensões (ex.: número de linhas de produção, número de materiais, quais são os passos de produção, etc.).

Resultados: dados objetivos referentes à parte do sistema de produção e as diferentes etapas do processo produtivo.

### 3.1.2. ***Especificação do sistema***

Escopo: definir as condições de contorno, isto é, os limites do sistema a ser estudado assim como as diferentes partes que o compõe, estabelecendo simplificações, se necessário.

Resultados: definição conceitual do sistema (ponto de partida para o desenvolvimento de modelos em PFS).

### 3.1.3. **Modelo conceitual (PFS)**

Escopo: construir o modelo conceitual do sistema definido no passo anterior. Esse é um modelo geral da estrutura do sistema com seus principais componentes, sem detalhes sobre seu comportamento dinâmico.

Resultados: modelo PFS inicial (ponto de partida para o desenvolvimento de modelos em MFG)

### 3.1.4. **Modelo detalhado (MFG)**

Escopo: construir um modelo detalhado do funcionamento do sistema, onde de cada uma das atividades identificadas no PFS deriva um novo diagrama MFG, que representa o comportamento dinâmico do sistema.

Resultados: diagrama MFG de cada processo produtivo.

### 3.1.5. **Análise estrutural e qualitativa dos processos**

Escopo: verificar os dois diagramas obtidos (PFS e MFG) para confirmar que representam devidamente a estrutura e o funcionamento do sistema conforme as especificações inicialmente levantadas.

Resultados: conclusões relacionadas ao funcionamento do sistema.

### 3.1.6. **Coleta de dados específicos para validação dos modelos**

Escopo: coleta de dados complementares necessários para a simulação do sistema através dos modelos MFG desenvolvidos (tempos, número de operários, produtividade das máquinas, necessidade de manutenção das máquinas).

Resultados: dados numéricos das variáveis do sistema e identificação das principais situações/cenários a serem avaliados.



### 3.1.7. **Modelo para simulação (HPSim e Promodel)**

Escopo: edição do modelo de simulação no software HPSim e no software Promodel, utilizando como base os modelos MFG já desenvolvidos e os dados específicos coletados.

Resultados: modelos em Rede de Petri e em Promodel para a simulação.

### 3.1.8. **Simulação e validação do modelo**

Escopo: simulação dos modelos editados no passo anterior e verificação de seus funcionamentos, caso necessário identifica-se aqui a revisão de alguma atividade anterior.

Resultados: verificação dos modelos desenvolvidos.

### 3.1.9. **Análise funcional e quantitativa dos processos**

Escopo: simulação de diferentes cenários do processo produtivo, comparando os resultados tanto com os modelos em MFG como com o software Promodel

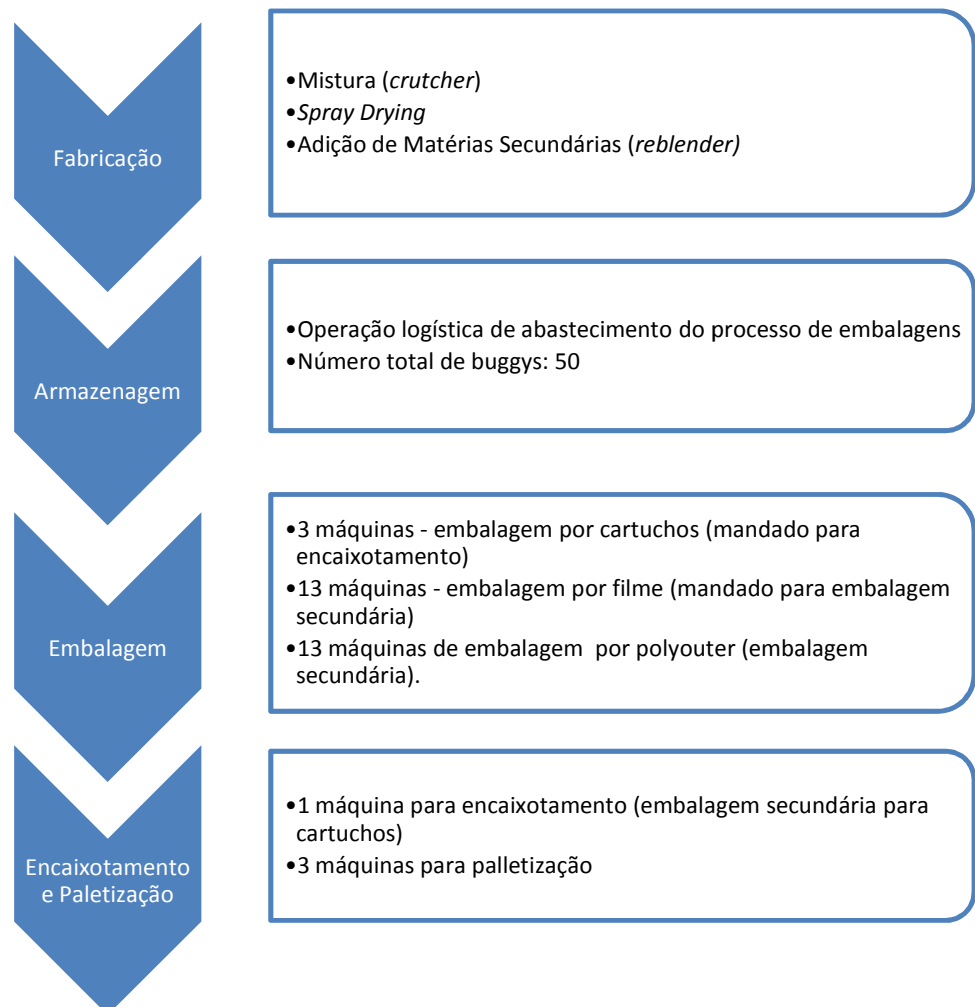
Resultados: avaliação quanto às técnicas de modelagem e análise de sistemas.

## 3.2. Estudo preliminar do sistema de produção

A Figura 3 representa uma visão simplificada do processo (*overview*) onde são representadas as principais etapas de produção. Uma explicação detalhada de cada passo se encontra a seguir:

- Fabricação: com exceção do processo de encaixotamento, todas as outras atividades citadas são realizadas no mesmo edifício, que é chamado de Torre de Produção. A fábrica é montada em um layout vertical, sendo que o processo de produção ocorre de cima para baixo:

partindo dos níveis mais altos temos a coleta e adição de matéria-prima, a mistura no *crutcher*, filtragem e *spray drying* obtendo-se, assim, a base branca que fica armazenada em silos, quando necessário essa base branca é misturada com materiais de pós-adição necessários para formar o granel<sup>3</sup>, que desce para o Piso de Armazenagem.



**Figura 3. Overview do Processo de Produção**

- Armazenagem (*Buggy Floor*): este piso é reservado somente para a armazenagem e distribuição do granel a ser embalado. Quatro operadores trabalham na movimentação dos chamados *buggys*, que

<sup>3</sup> Granel é um nome utilizado para se referir ao pó do sabão, pronto para ser embalado.

são bolsas de armazenagem com capacidade de uma tonelada de produto cada uma. Essas bolsas possuem aberturas na parte superior, para abastecimento, e na parte inferior, para descarregar o produto. O objetivo deste piso é, principalmente, distribuir o granel que vem do andar de cima para a máquina correta que deve embalá-lo no andar de baixo.

- Embalagem: o piso da embalagem é o piso térreo da Torre de Produção, nele existem 13 linhas de embalagem por filme (uma embalagem plástica), com máquinas para embalagem primária e secundária, resultando em fardos, e três linhas de embalagem por cartucho (uma embalagem em papel-cartão), que seguem para o encaixotamento.
- Encaixotamento e Palletização: os cartuchos são enviados para o encaixotamento enquanto os fardos vão diretamente para a palletização, a primeira etapa é feita automaticamente, enquanto a segunda necessita de atuação humana para prosseguir.

Na planta atual existem 15 tipos de sabões diferentes produzidos na fábrica, esses sabões são embalados em tamanhos diferentes, resultando em um total de 37 tipos de produtos finais.

Existem três bases brancas diferentes na etapa inicial de produção, para cada base o processo inicial deve ser ajustado (*setup*). O processo de pós-adição também precisa passar por *setup* para cada um dos 15 tipos de sabão em pó.

No piso de embalagem, as linhas passam por um *setup* relativamente curto para ajustar a produção entre embalagens de mesmo tamanho e um *setup* relativamente maior para ajustar o tamanho da embalagem. O *setup* das linhas de produção de filmes é mais curto que das linhas de produção de cartuchos.

A etapa de Encaixotamento e Paletização só passa por *setup* na ocasião de mudança do tamanho dos cartuchos. A etapa de Palletização não precisa de *setup*.

Além da produção habitual, a fábrica também conta com pacotes promocionais que são aqui desconsiderados por falta, no momento, de dados precisos em relação ao no processo de *setup* da embalagem.

Para cada tipo de sabão em pó existe uma fórmula específica com matérias-primas diferenciadas, somando no total mais de 40 matérias-primas. Essas matérias-primas ficam armazenadas em tanques ao lado da Torre de Produção (materiais líquidos e usados em grande quantidade) ou dentro dela (materiais usados em pequena quantidade).

Cada um dos 37 tipos de produtos finais possui uma embalagem primária e uma secundária próprias, somando mais de 70 materiais de embalagem. Esses ficam estocados no próprio piso de embalagem.

### **3.3. Especificação do Sistema**

Definido o escopo e conhecida a complexidade do processo se torna necessário estabelecer fronteiras explícitas entre o sistema e o ambiente, aplicando simplificações adequadas ao seu estudo. Suas especificações se encontram a seguir.

- Sistema: sistema de produção de sabão em pó. Sua fronteira é limitada somente aos processos de fabricação, armazenagem, embalagem e encaixotamento. A cadeia de suprimento se mantém fora do sistema, assim como a parte de estocagem.
- Entidades: linhas de fabricação, *buggys* e linhas de embalagem
- Atributos: fabricação – quantidades produzidas e armazenadas de cada tipo de base branca e de cada tipo de sabão; *buggys* – movimentação e quantidade de *buggys*; embalagem – número de máquinas em trabalho e distribuição, em cada máquina, dos tipos produtos a serem produzidos.
- Atividades: transformação de materiais, transporte e armazenagem de produtos finais e intermediários.
- Eventos: chegada de pedidos e saída de produto acabado.

Considerações adotadas para o presente estudo e características do sistema:

- Devido a complexidade da etapa de “fabricação” ela foi dividida em duas atividades, “*crutcher*” (produção de base branca) e “pós-adição”.
- A “etapa de encaixotamento e paletização” é fisicamente conectada a cada uma das linhas de embalagem, portanto ela será aglutinada à uma única atividade denominada “embalagem”.
- Serão consideradas apenas 2 bases brancas: uma das 3 bases brancas é produzida em uma quantidade expressivamente menor que as outras duas, assim ela é omitida na modelagem de todo o processo de produção.
- Apenas 5 tipos de detergente (granéis) serão considerados. Cada um desses granéis pode ser embalado em 2 tamanhos diferentes, totalizando 10 tipos de produto acabado diferentes: esses 10 tipos constituem atualmente as principais produções e vendas da fábrica.
- Um total de 14 matérias-primas participam do processo de produção, sendo 6 matérias-primas para o processo de fabricação da base branca, e 8 matérias-primas para o processo de pós-adição: foram selecionadas aquelas que são consumidas em uma quantidade maior, além daquelas necessárias para diferenciar cada um dos granéis resultantes.
- Para cada produto acabado é utilizado 1 material de embalagem primária, totalizando 10 materiais diferentes. Para a embalagem secundária, são utilizados apenas 2 materiais, um para embalar cartuchos e outro para embalar filmes.
- O modelo considera 2 linhas para embalagem por cartuchos e 5 linhas para embalagem por filmes. Esta relação está de acordo com o volume de vendas atual dos produtos acabados selecionados.
- Refletindo a produção real, os sabões de tipo 1 e 2 serão embalados somente em cartuchos, enquanto os sabões tipos 3, 4 e 5 serão embalados somente em filmes.

As considerações adotadas neste projeto com relação à quantidade de matérias-primas, tipos de sabão e número de linhas de embalagem foram proporcionais entre si, de modo a minimizar erros provenientes das simplificações.

### 3.4. Modelo conceitual (PFS)

Utilizando-se a metodologia PFS/MFG (Miyagi, 1996) desenvolvem-se inicialmente o modelo em PFS apresentado na Figura 4.

Esse nível de abstração proporciona um entendimento inicial de como cada variável do sistema se relaciona, nele as 4 principais atividades estão identificadas.

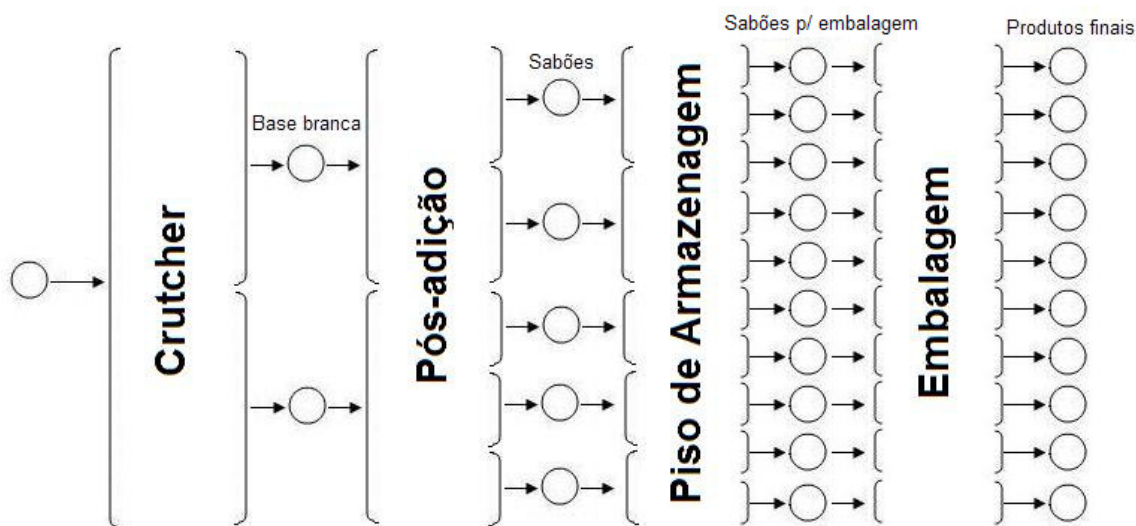


Figura 4. Modelo PFS

### 3.5. Modelo detalhado (MFG)

Os modelos PFS representam a estrutura do sistema e seus principais componentes, mas para representar sua dinâmica se torna necessário construir um modelo MFG. No presente sistema, um dos aspectos a ser analisado no modelo MFG é a resposta do sistema a demanda do mercado. O que será produzido, quais materiais serão consumidos e que linha de produção será utilizada dependem diretamente do planejamento de produção, baseado na atual demanda de mercado.

Para representar a dinâmica do processo cada uma de suas etapas de fabricação foi analisada em detalhes, através do modelo MFG.

As atividades detalhadas são a mistura do *crutcher*, as pós-adições de base branca I, e da base branca II, a armazenagem e por fim a embalagem.

### 3.5.1. Atividade [mistura (crutcher)]

A etapa de mistura no *crutcher* segue uma produção básica comum a todos os tipos de sabões produzidos, representado na Figura 5. A partir daí uma ordem de produção (baseada na demanda) define qual será a base branca produzida. Cada tipo de base branca possui um silo de armazenagem próprio.

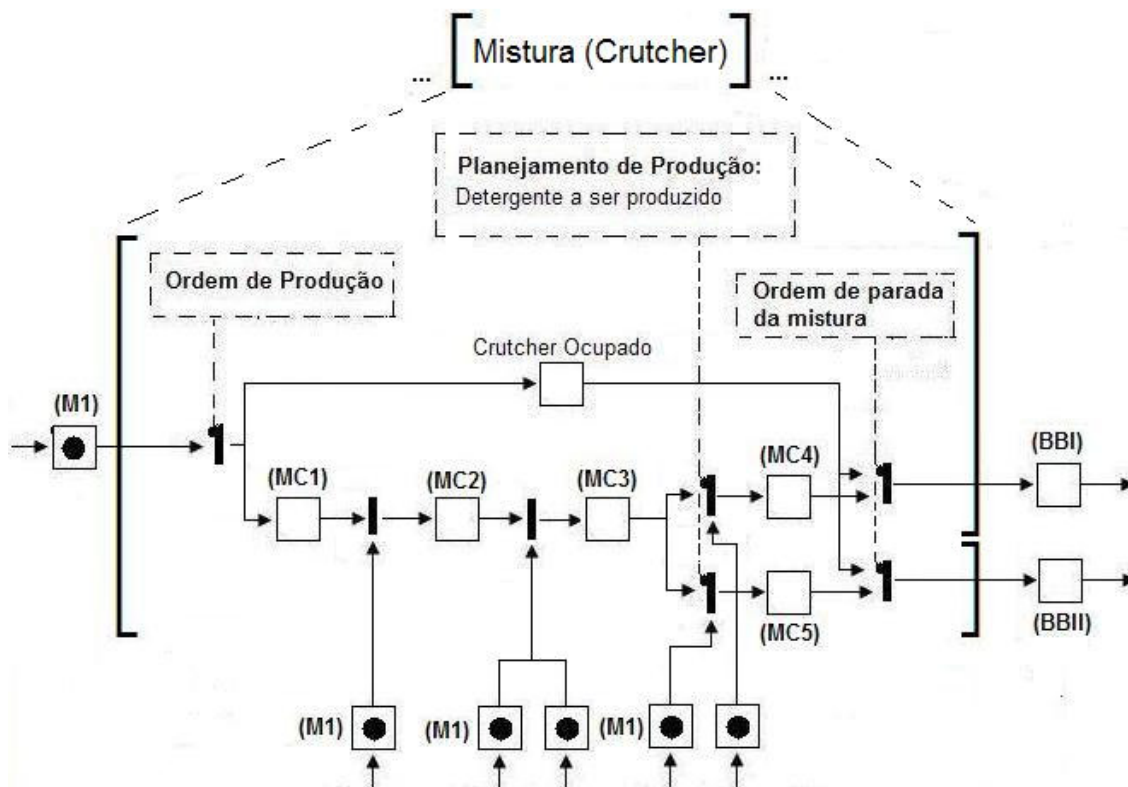


Figura 5.1. MFG da atividade [mistura (crutcher)]

#BOX	Descrição
<b>M1.</b>	Buffers de matéria-prima para formação da base branca (materiais A, B, C, D, E, F).
<b>MC1.</b>	Descarregamento do material A no Crutcher.
<b>MC2.</b>	Descarregamento do material B e início da mistura: materiais A + B.
<b>MC3.</b>	Descarregamento dos materiais C e D e segunda etapa da mistura: materiais A + B + C + D.
<b>MC4.</b>	Descarregamento do material E e mistura da base branca tipo I (BBI): materiais A + B + C + D + E.
<b>MC5.</b>	Descarregamento do material F e mistura da base branca tipo II (BBII): materiais A + B + C + D + F.
<b>BBI.</b>	Buffer (silo de armazenagem) base branca tipo I.
<b>BBII.</b>	Buffer (silo de armazenagem) base branca tipo II.

Figura 5.2. Descrição dos itens do MFG da atividade [mistura (crutcher)]

### 3.5.2. Atividade [pós-adição (base branca I)]

A base branca I é a mistura básica necessária para formar dois tipos diferentes de sabão, cada um deles utiliza matérias-primas específicas em sua composição. Este MFG está representado na figura 6.

Após o box PAI2 uma ordem de produção específica qual tipo de sabão será produzido. Os granéis resultantes são encaminhados para o Piso de Armazenagem através de um dos dois silos de descarregamento (de acordo com uma ordem de armazenagem), existem apenas estes dois silos de descarregamento que devem ser compartilhados por todos os sabões produzidos.

Na fábrica só existe um sistema de pós-adição, tanto o processo da base branca I quanto o processo da base branca II compartilham o mesmo sistema. Devido a isso é necessário, em uma etapa posterior, levar em conta o tempo de *setup* necessário para mudar o processamento entre os diferentes tipos de sabão.

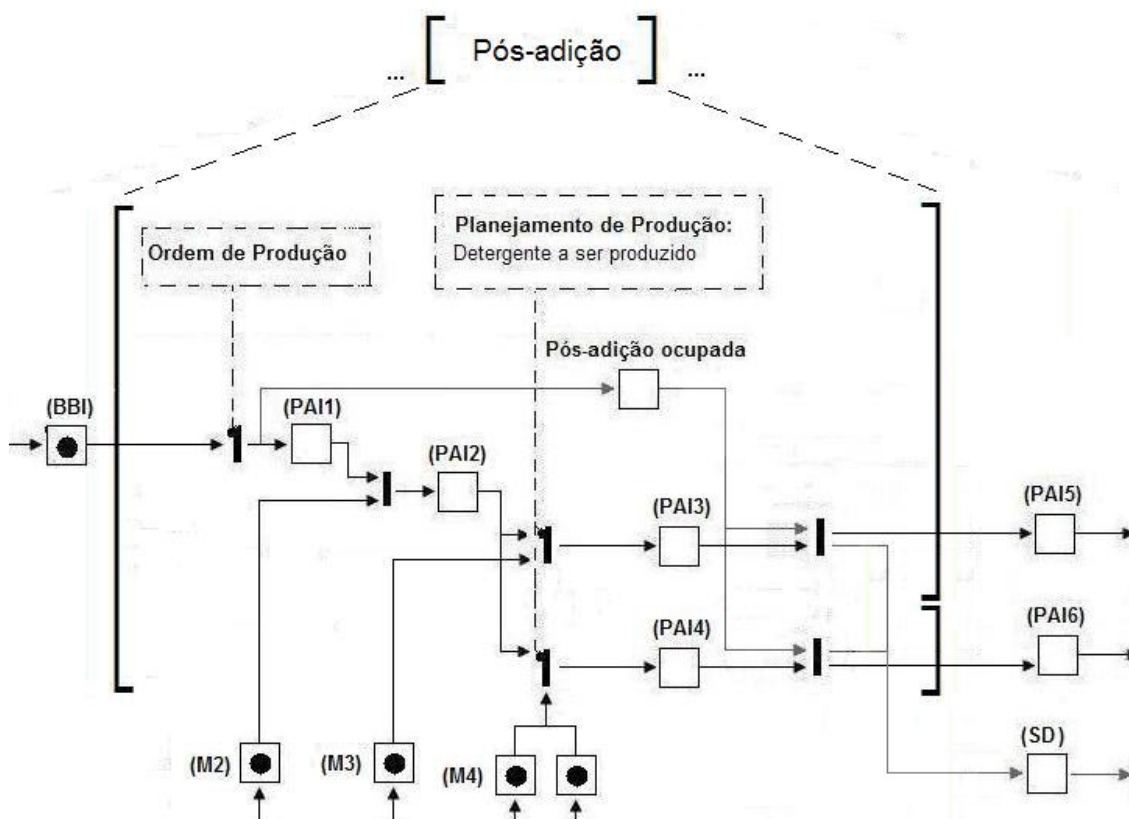


Figura 6.1. MFG da atividade [pós-adição (base branca 1)]



#BOX	Descrição
<b>BBI.</b>	Buffer (silo de armazenagem) Base Branca I.
<b>M2.</b>	Buffer de matéria-prima para pós-adição (material G, para uso em BBI).
<b>M3.</b>	Buffer de matéria-prima para pós-adição (material H, para produção do sabão tipo 1).
<b>M4.</b>	Buffers de matéria-prima para pós-adição (materiais I e J, para produção do sabão tipo 2).
<b>PAI1.</b>	Descarregamento do BBI.
<b>PAI2.</b>	Descarregamento do material G e início da mistura: materiais BBI + G.
<b>PAI3.</b>	Descarregamento do material H e mistura final do sabão tipo 1: materiais BBI + G + H.
<b>PAI4.</b>	Descarregamento dos materiais I e J e mistura final do sabão tipo 2: materiais BBI + G + I + J.
<b>PAI5.</b>	Armazenagem do sabão 1 em um dos silos de descarregamento.
<b>PAI6.</b>	Armazenagem do sabão 2 em um dos silos de descarregamento.
<b>SD.</b>	Silo(s) de descarregamento ocupado(s) (são 2 silos de descarregamento).

**Figura 6.2. Descrição dos itens do MFG da atividade [pós-adição (base branca 1)]**

### 3.5.3. Atividade [pós-adição (base branca II)]

A base branca II é a mistura básica necessária para formar três tipos diferentes de sabão. Assim como no processo de base branca I, cada um desses tipos de sabão utiliza matérias-primas específicas em sua composição. A Figura 7 apresenta o MFG da atividade [pós-adição (base branca II)]

Este processo ocorre de maneira similar ao da base branca I, tendo como principal diferença o número de materiais adicionados. Da mesma maneira, os granéis resultantes são encaminhados para o piso de armazenagem através de um dos dois silos de descarregamento.

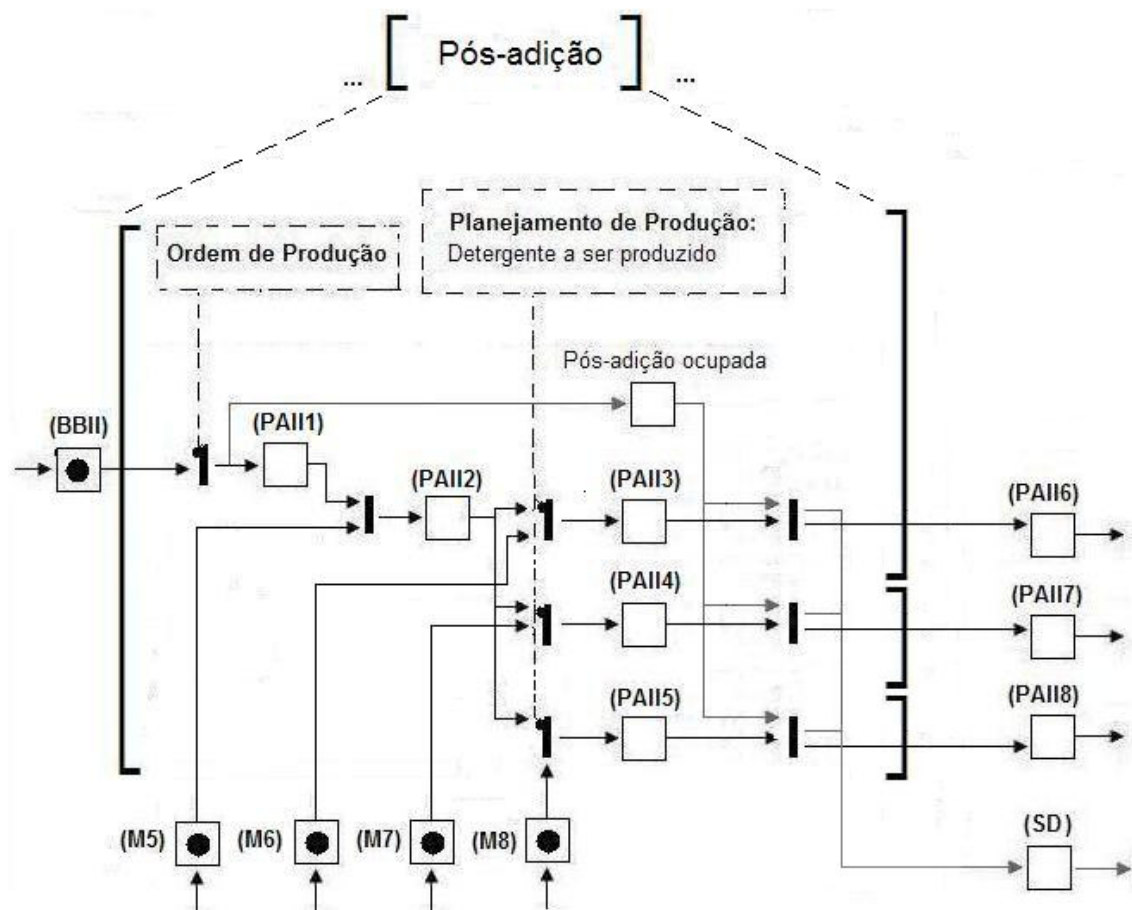


Figura 7.1. MFG da atividade [pós-adição (base branca 2)]

#BOX	Descrição
<b>BBII.</b>	Buffer (silo de armazenagem) Base Branca II.
<b>M5.</b>	Buffer de matéria-prima para pós-adição (material K, para uso em BBII).
<b>M6.</b>	Buffer de matéria-prima para pós-adição (material L, para produção do sabão tipo 3).
<b>M7.</b>	Buffer de matéria-prima para pós-adição (material M, para produção do sabão tipo 4).
<b>M8.</b>	Buffer de matéria-prima para pós-adição (material N, para produção do sabão tipo 5).
<b>PAII1.</b>	Descarregamento do BBII.
<b>PAII2.</b>	Descarregamento do material K e início da mistura: materiais BBII + K
<b>PAII3.</b>	Descarregamento do material L e mistura final do sabão tipo 3: materiais BBII + K + L.
<b>PAII4.</b>	Descarregamento do material M e mistura final do sabão tipo 4: materiais BBII + K + M.
<b>PAII5.</b>	Descarregamento do material N e mistura final do sabão tipo 5: materiais BBII + K + N.
<b>PAII6.</b>	Armazenagem do sabão 3 em um dos silos de descarregamento.
<b>PAII7.</b>	Armazenagem do sabão 4 em um dos silos de descarregamento.
<b>PAII8.</b>	Armazenagem do sabão 5 em um dos silos de descarregamento.
<b>SD.</b>	Silo(s) de descarregamento ocupado(s) (são 2 silos de descarregamento).

**Figura 7.2. Descrição dos itens do MFG da atividade [pós-adição (base branca 2)]**

#### 3.5.4. **Atividade [armazenagem]**

A partir do material depositado no silo de descarregamento, o processo continua no piso de armazenagem, onde os granéis são direcionados para as linhas de produção que estão trabalhando com o sabão determinado.

Nessa etapa o principal desafio se encontra em definir para qual linha de produção deve-se encaminhar o *buggy*, isso está representado através de uma ordem externa de produção.

A atividade [armazenagem] representada na Figura 8 é relativo ao sabão tipo 1, equivalente ao do tipo 2. Para os sabões tipos 3, 4 e 5 o processo será análogo, mas com 5 linhas de embalagem disponíveis, ao invés de 2.

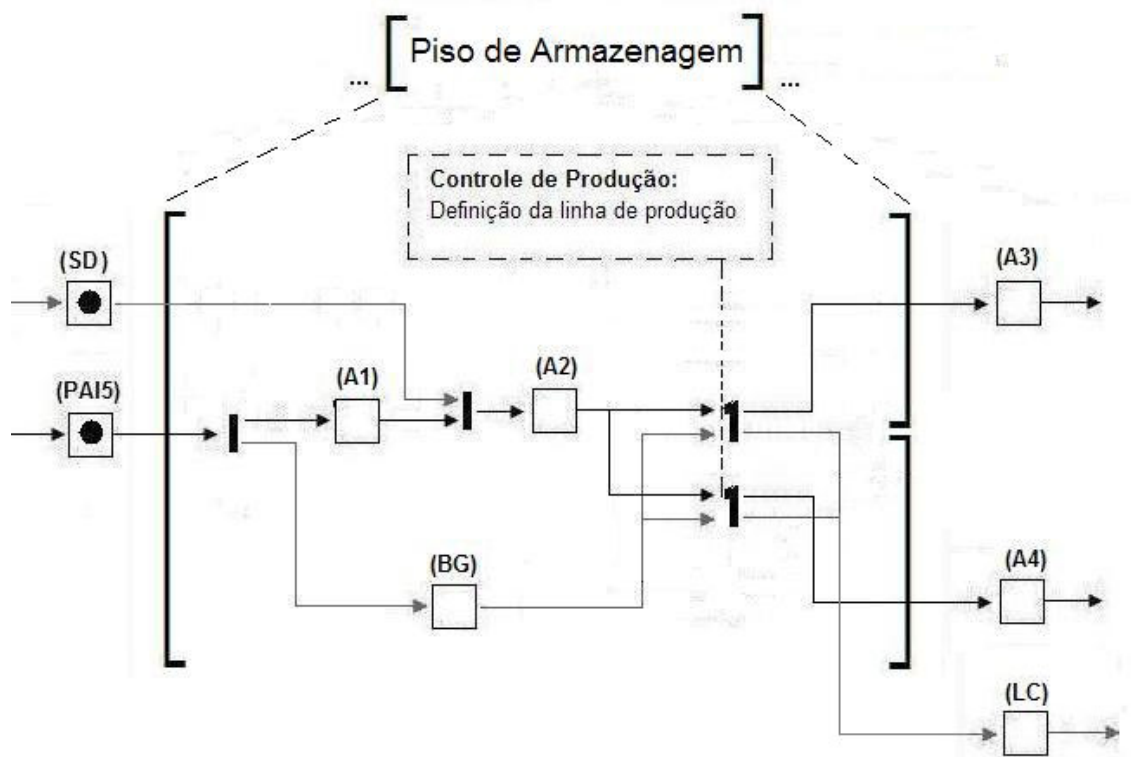


Figura 8.1. MFG da atividade [piso de armazenagem]

#BOX	Descrição
<b>PAI5.</b>	Armazenagem do sabão 1 em um dos silos de descarregamento.
<b>SD.</b>	Silo(s) de descarregamento ocupado(s) (são 2 silos de descarregamento).
<b>BG.</b>	Buggy (existem 20 Buggys disponíveis).
<b>A1.</b>	Abastecimento do Buggy.
<b>A2.</b>	Buffer de Buggys do sabão 1.
<b>A3.</b>	Descarregamento do Buggy para fabricar o produto acabado: tipo 1 em 500 g
<b>A4.</b>	Descarregamento do Buggy para fabricar o produto acabado: tipo 1 em 1 kg
<b>LC.</b>	Linha de embalagem cartuchos (existem 2 linhas disponíveis)

Figura 8.2. Descrição dos itens do MFG da atividade [piso de armazenagem]

### 3.5.5. Atividade [embalagem]

Nas sete linhas de produção disponíveis são embalados os dez produtos finais diferentes. O sabão descarregado em uma determinada linha recebe a

embalagem primária, segue para a embalagem secundária e, finalmente, para a palletização.

Na Figura 9 está representado o MFG da atividade [embalagem] para o sabão tipo 1, embalado em 500g, na linha 1. Os outros processos de produção são análogos, variando somente os materiais usados para a embalagem e o produto final obtido.

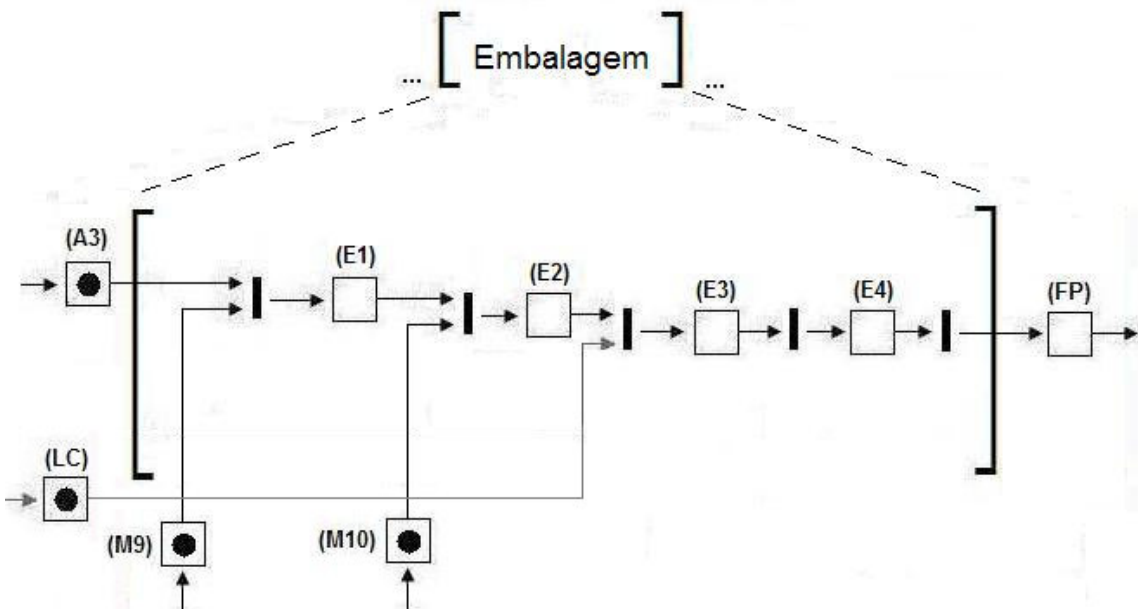


Figura 9.1. MFG da atividade [embalagem] para o sabão tipo 1

#BOX	Descrição
A3.	Descarregamento do Buggy para fabricar o produto acabado: tipo 1 em 500 g.
LC.	Linha de embalagem cartuchos (existem 2 linhas disponíveis).
M9.	Buffer da embalagem primária: sabão 1, 500g.
M10.	Buffer da embalagem secundária: cartuchos.
E1.	Processo de embalagem primária.
E2.	Processo de embalagem secundária.
E3.	Buffer de produto para palletização.
E4.	Processo de palletização.
FP.	Buffer do produto acabado: sabão 1, 500g.

Figura 9.2. Descrição dos itens do MFG da atividade [embalagem] para o sabão tipo 1

### 3.6. Análise Estrutural e Qualitativa dos Processos

Com base no grafo resultante e na evolução dos estados dos modelos MFG, isto é, pelo comportamento das marcas, pode-se identificar diferentes partes do grafo que podem se tornar gargalos durante a produção.

Estas partes são identificadas, principalmente, pelos utensílios e máquinas utilizadas. Uma baixa velocidade de processamento em uma das máquinas pode gerar um gargalo, prejudicando todo o resto do processo de produção. As diferentes partes do MFG que podem se tornar gargalos são:

- Atividade [mistura] – a fábrica possui apenas um *crutcher*, caso sua velocidade de processamento seja baixa esta etapa se tornará um gargalo.
- Atividade [pós-adição] – a fábrica possui somente uma linha de pós-adição que deve ser utilizado pelos 5 tipos diferentes de sabão. Pelo fato de lidar com diferentes tipos de produto essa etapa está mais sujeita a se tornar um gargalo do que a etapa anterior.
- Atividade [armazenagem] – a velocidade de descarregamento dos *buggys* pode se tornar uma restrição para o processo. Além disso, o número de posições de armazenagem (número de *buggys*) impacta diretamente no balanço de velocidades de produção entre a Torre e a embalagem (algo que pode ser comprovado na etapa de simulação).
- Atividade [embalagem] – nessa etapa observam-se duas restrições, o número de linhas disponíveis e os diferentes formatos da embalagem. Embalar em 500g demanda mais tempo do que embalar em 1kg, isso porque em 500g será necessário o dobro de embalagens, o que aumenta o tempo ocioso entre a passagem de duas embalagens pela linha. Devido a isso a atividade [embalagem] pode ou não ser um gargalo, dependendo do que está sendo produzido.
- Buffer de materiais – o tamanho do buffer de materiais, associado ao tempo de entrega dos fornecedores, pode se transformar em um limitador do processo. Para garantir que não irão faltar material os buffers devem ter um tamanho adequado.

## 4. Simulação

Através dos modelos MFG construídos na etapa anterior desenvolve-se as simulações para análise do sistema de produção.

Primeiramente os dados coletados foram revisados, adicionando informações específicas baseadas na maneira como o sistema foi modelado em MFG. A partir dessas informações foram construídos os modelos em rede de Petri para simulação no HPSim e o modelo para simulação em ProModel. A seguir apresentam-se informações básicas sobre as simulações e seus resultados.

### 4.1. Informações Específicas

Para executar as simulações coletou-se os dados referentes à duração de cada etapa de produção, assim como a quantidade de material produzido nesse período. Essas informações se encontram a seguir:

- Produção de Base Branca:
  - Tempo total do processo – 10 min.
  - Quantidade produzida – 3 ton.
  - *Buffers* de base branca – 30 ton.
- Pós-adição:
  - Tempo total do processo – 12 min.
  - Quantidade produzida – 3 ton.
- Descarregamento:
  - Tempo total do processo – 8 min.
  - Quantidade produzida – 1 ton.
  - 2 posições de descarregamento.
- Transporte:
  - Tempo total do processo – 4 min.
  - Quantidade produzida – 1 ton.
  - No. de *buggys* – 20.
- Embalagem (1kg):
  - Tempo total do processo – 1 min.

- Quantidade produzida – 96 kg.
- No. de linhas – 7.
- Embalagem (0,5kg):
  - Tempo total do processo – 1 min.
  - Quantidade produzida – 60 kg.
- Paletização (1kg):
  - Tempo total do processo – 3 min.
  - Quantidade produzida – 288 kg.
- Paletização (0,5kg):
  - Tempo total do processo – 3 min.
  - Quantidade produzida – 240 ton.

## 4.2. Simulação em HPSim

O modelo em redes de Petri foi construído utilizando o software de simulação “HP Sim”. As Figuras, 10, 11, 12, 13 e 14 ilustram as 4 partes do sistema, modeladas em rede de Petri. O modelo completo se encontra em anexo (Anexo II).

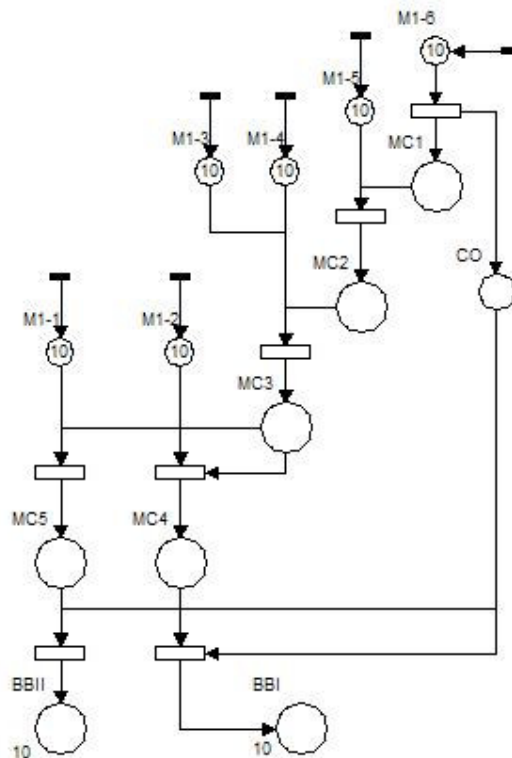


Figura 10. Atividade [mistura (crutcher)] em rede de Petri (HP Sim)



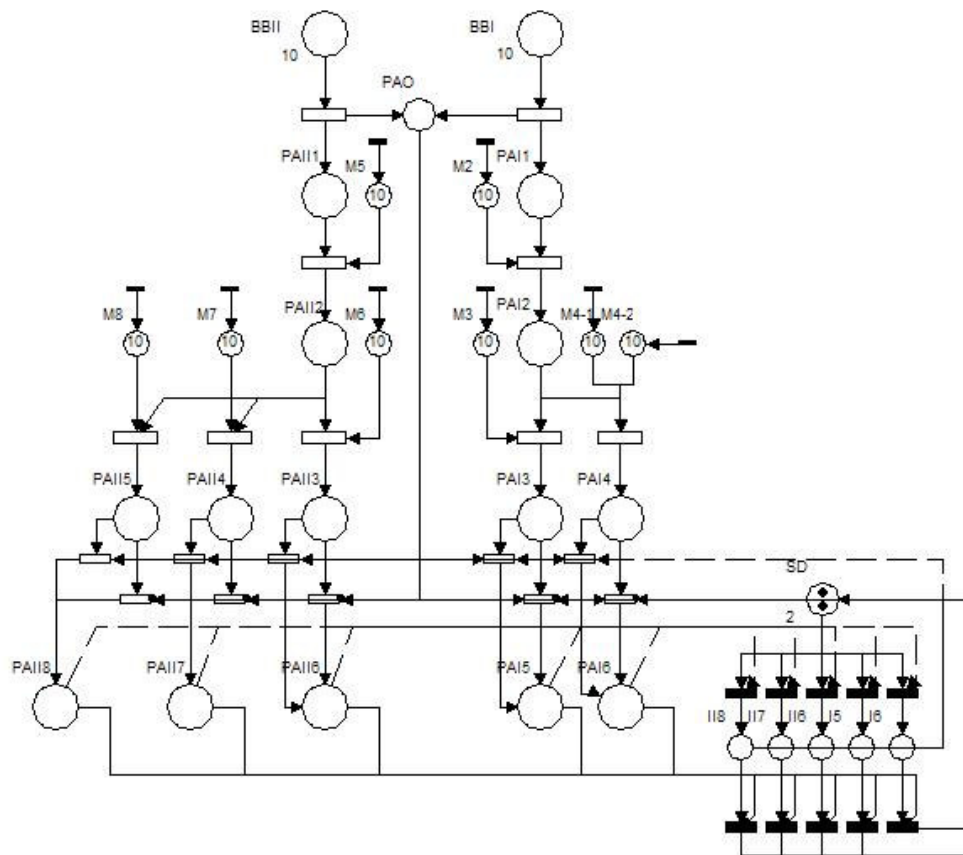


Figura 11. Atividade [pós-adição] em rede de Petri (HP Sim)

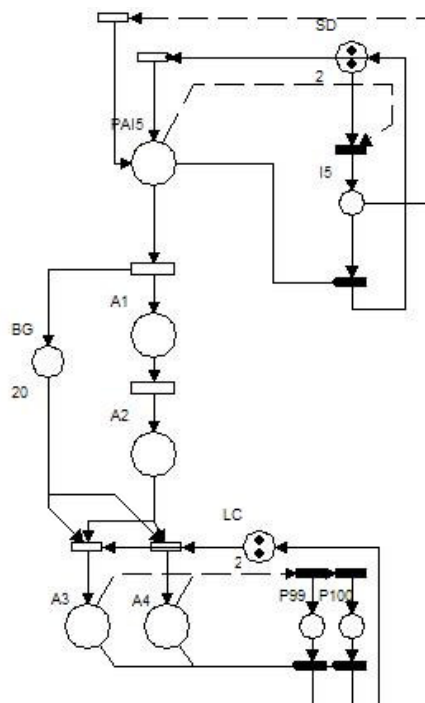


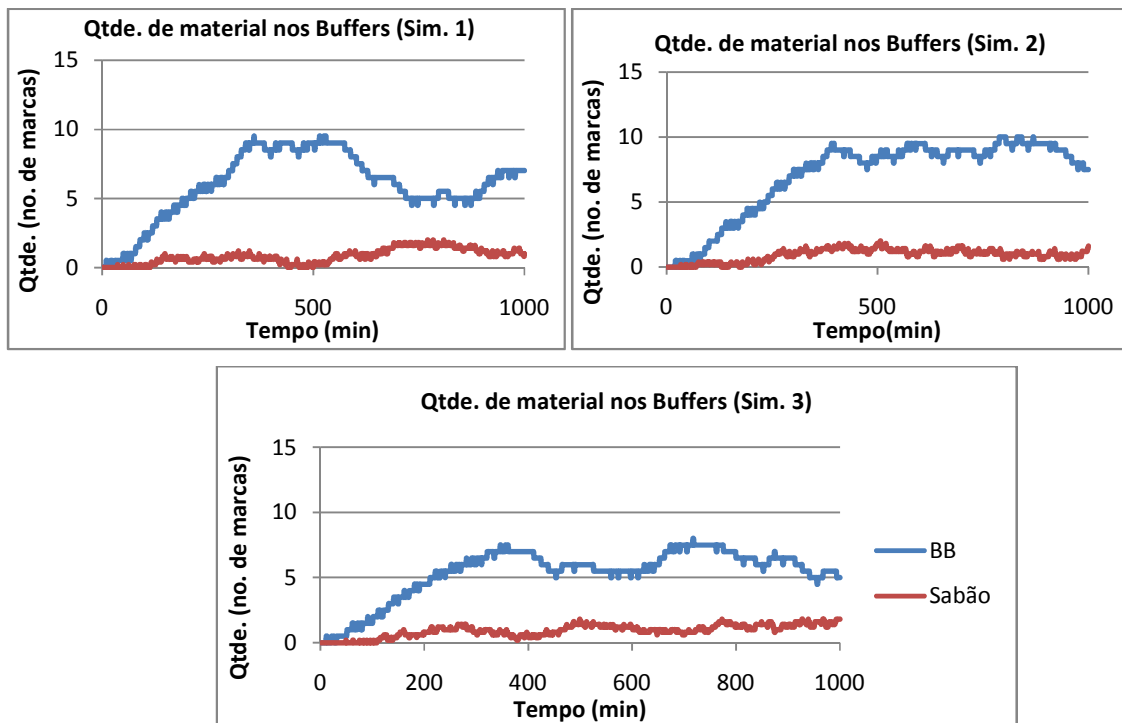
Figura 12. Atividade [armazenagem] em rede de Petri (HP Sim)



3. Percentual do tempo de utilização das ferramentas (ex.: Crutcher, Pós-adição, Posições de Descarregamento, Buggys) – Tabela 2 e Figura 15
4. Tempo de espera do sistema (devido a gargalos no processo) – Tabela 3

**Tabela 1. Quantidade de Produtos Produzidos**

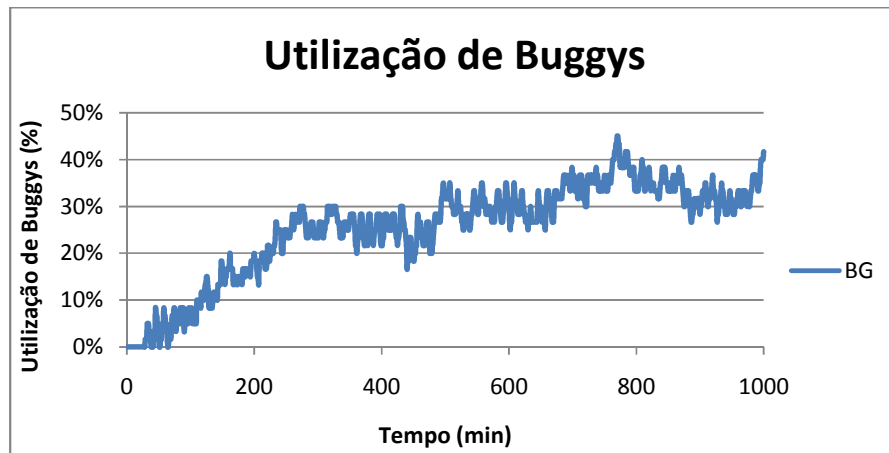
		Qtde. Produzida (paletes)		
		Sim. 1	Sim. 2	Sim. 3
FP-3	Sabão Tipo 1 (1kg)	79	16	44
FP-4	Sabão Tipo 1 (0,5kg)	82	17	55
FP-7	Sabão Tipo 2 (1kg)	23	93	73
FP-8	Sabão Tipo 2 (0,5kg)	34	97	54
FP-11	Sabão Tipo 3 (1kg)	37	38	72
FP-12	Sabão Tipo 3 (0,5kg)	37	45	48
FP-15	Sabão Tipo 4 (1kg)	46	48	45
FP-16	Sabão Tipo 4 (0,5kg)	37	40	37
FP-19	Sabão Tipo 5 (1kg)	55	58	26
FP-20	Sabão Tipo 5 (0,5kg)	51	46	29
Total (paletes)		402	482	439
Total (ton)		127,0	131,7	128,4



**Figura 14. Gráficos com a evolução da quantidade de material nos buffers de Base Branca e Sabão**

**Tabela 2. Percentual de utilização das ferramentas**

		Tempo produtivo (%)		
		Sim. 1	Sim. 2	Sim. 3
CO	<b>Crutcher Ocupado</b>	87%	87%	88%
PAO	<b>Pós-adição Ocupada</b>	89%	89%	89%
SD	<b>Silos de Descarregamento Ocupados</b>	84%	87%	87%
LC	<b>Linha de Embalagem (cartuchos)</b>	69%	61%	70%
LB	<b>Linha de Embalagem (bolsas)</b>	59%	82%	60%



**Figura 15. Gráfico com a utilização dos buggys (em um total de 20 Buggys)**

**Tabela 3. Tempo de espera do Crutcher e da Pós-adição**

	Tempo de Espera (min)		
	Sim. 1	Sim. 2	Sim. 3
<b>Crutcher</b>	131	130	120
<b>Pós-adição</b>	110	102	105

A partir dos dados obtidos foi possível confrontar parte das suposições levantadas anteriormente:

- Associando o uso contínuo dos Silos de Descarregamento (SD) com o alto tempo de espera tanto da etapa de Base Branca (Crutcher) quanto da etapa de Pós-Adição nota-se que a etapa de descarregamento na atividade de [armazenagem] atuou como o maior gargalo do sistema.
- Neste nível de produção as linhas de embalagem estão sub-utilizadas e o número de *buggys* está super-dimensionado.

### 4.3. Simulação no ProModel

Tomando como base os modelos gerados em MFG desenvolveu-se também um modelo em ProModel. A Figura 16 mostra o modelo em execução no ProModel, enquanto as Tabelas 4, 5 e 6 mostram os “locais”, “entidades” e “recursos” utilizados nesse modelo.

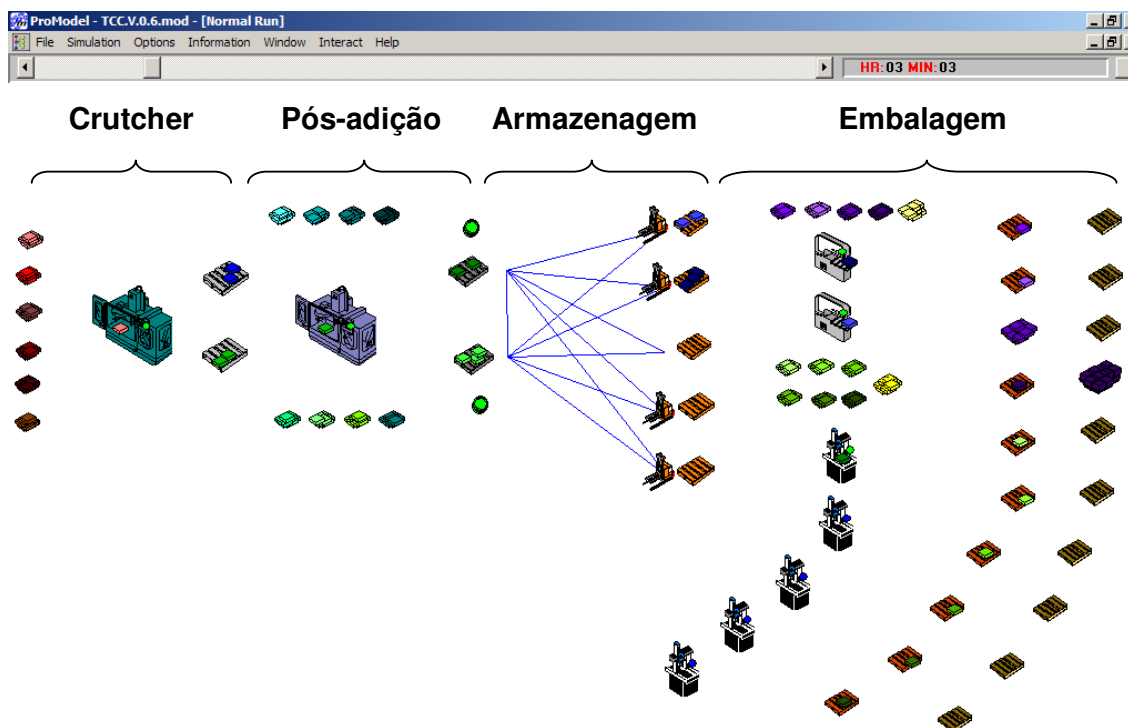


Figura 16. Tela do ProModel com os principais elementos do sistema de produção

Tabela 4. “Locais” do modelo em ProModel

Locais					
M1 6	M4 1	LC	S5	EB	S5_500
M1 5	M4 2	LB.1	ES1_1000	EC	FP_3
M1 3	M5	LB.2	ES1_500	S1_1000	FP_4
M1 2	M6	LB.3	ES2_1000	S1_500	FP_7
M1 1	M7	LB.4	ES2_500	S2_1000	FP_8
M1 4	M8	LB.5	ES3_1000	S2_500	FP_11
CO	PAO	LB	ES3_500	S3_1000	FP_12
BBI	SD1	S1	ES4_1000	S3_500	FP_15
BBII	SD2	S2	ES4_500	S4_1000	FP_16
M2	LC.1	S3	ES5_1000	S4_500	FP_19
M3	LC.2	S4	ES5_5000	S5_1000	FP_20

**Tabela 5. “Entidades” do modelo em ProModel**

Entidades					
MatA	MatI	Sabao5	Emb5_500	Sabao4_500	FP16
MatB	MatJ	Emb1_1000	EmbSecC	Sabao5_1000	FP19
MatC	MatK	Emb1_500	EmbSecB	Sabao5_500	FP20
MatD	MatL	Emb2_1000	Sabao1_1000	FP3	
MatE	MatM	Emb2_500	Sabao1_500	FP4	
MatF	MatN	Emb3_1000	Sabao2_1000	FP7	
BB1	Sabao1	Emb3_500	Sabao2_500	FP8	
BB2	Sabao2	Emb4_1000	Sabao3_1000	FP11	
MatG	Sabao3	Emb4_500	Sabao3_500	FP12	
MatH	Sabao4	Emb5_1000	Sabao4_1000	FP15	

**Tabela 6. “Recursos” do modelo em ProModel**

Recursos					
BG.1	BG.5	BG.9	BG.13	BG.17	BG
BG.2	BG.6	BG.10	BG.14	BG.18	SD AUX1
BG.3	BG.7	BG.11	BG.15	BG.19	SD AUX2
BG.4	BG.8	BG.12	BG.16	BG.20	

#### 4.3.1. *Testes e Resultados – ProModel*

Assim como na simulação no HPSim, o primeiro teste foi realizado com o sistema em suas situações normais. Abaixo estão representados os resultados, no mesmo formato usado anteriormente, sendo o tempo representado por horas. A única exceção se encontra na utilização dos *buggys*, representada como a média total. As diferenças entre as duas simulações são explicadas após os resultados.

**Tabela 7. Quantidade de produtos produzidos**

	Qtde. (paletes)
FP-3 Sabão Tipo 1 (1kg)	73
FP-4 Sabão Tipo 1 (0,5kg)	123
FP-7 Sabão Tipo 2 (1kg)	66
FP-8 Sabão Tipo 2 (0,5kg)	119
FP-11 Sabão Tipo 3 (1kg)	56
FP-12 Sabão Tipo 3 (0,5kg)	42
FP-15 Sabão Tipo 4 (1kg)	70
FP-16 Sabão Tipo 4 (0,5kg)	119
FP-19 Sabão Tipo 5 (1kg)	30
FP-20 Sabão Tipo 5 (0,5kg)	89
<b>Total (paletes)</b>	<b>787</b>
<b>Total (ton)</b>	<b>203,0</b>

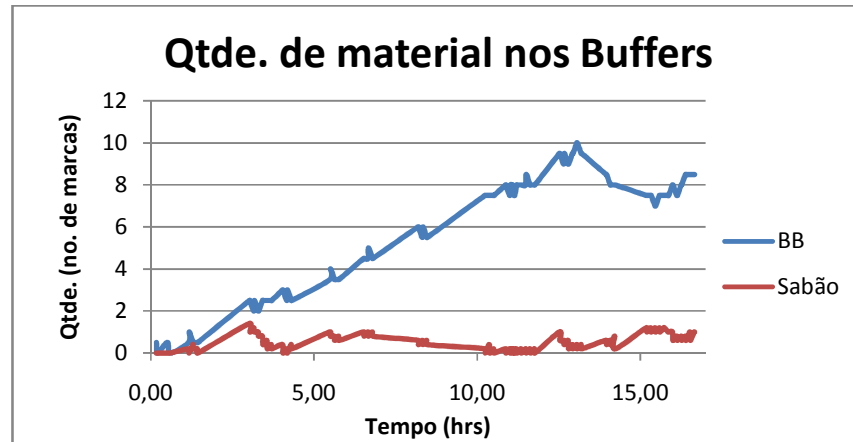


Figura 17. Gráfico com a quantidade de material nos buffers de Base Branca e Sabão produzido

Tabela 8. Percentual de utilização das ferramentas

		Tempo produtivo (%)
CO	Crutcher Ocupado	92%
PAO	Pós-adição Ocupada	89%
SD	Silos de Descarregamento Ocupados	87%
LC	Linha de Embalagem (cartuchos)	86%
LB	Linha de Embalagem (bolsas)	36%
BG	Buggys	10%

Tabela 9. Tempo de espera do Crutcher e da Pós-adição

	Espera (min)
Crutcher	79
Pós-adição	99

A grande diferença entre as duas simulações (HPSim e Promodel) se encontra no total de sabão produzido: uma média de 129 ton para o caso do teste com o HPSim e de 203 ton para o teste conduzido com o Promodel. Essa diferença também é refletida no percentual de utilização de *buggys*: uma média de 25% no caso do HPSim e de 10% para o Promodel; e nos *buffers* de sabão: uma média de 2 para o HPSim e de 1 para o Promodel.

Essa diferença ocorreu porque as linhas de embalagem no Promodel funcionaram mais rapidamente do que as linhas de embalagem no HPSim. O modelo construído para simulação em HPSim não permite que diferentes linhas de embalagem embalem o mesmo tipo de produto acabado (ex.: Sabão 1, 1kg,

produzido simultaneamente nas 2 linhas de cartuchos). Essa diferença representa uma limitação do modelo construído para simulação em HPSim. É uma falha que pode ser corrigida, porém isso é relativamente complicado para fazer parte do presente trabalho.

Ao final, através deste estudo comparativo, os modelos MFG desenvolvidos foram devidamente validados.

Adicionalmente, como conclusões preliminares dos resultados da simulação em Promodel podem-se citar as mesmas conclusões obtidas com a simulação em HPSim, adicionando o seguinte item:

- Existe uma grande diferença entre o tempo produtivo das linhas de embalagem por cartucho (LC) e as linhas de embalagem por bolsa (LB), isso reflete o menor número de linhas de embalagem por cartucho. Para um maior nível de produção a embalagem por cartuchos pode se tornar um gargalo devido ao baixo número de linhas.

#### **4.4. Otimização do Sistema**

Partindo das conclusões obtidas no item anterior é possível utilizar o modelo para buscar possíveis melhorias no processo de produção.

O objetivo aqui é eliminar o tempo de espera de diversas partes da linha de produção. O tempo gasto em espera é considerado um esforço morto, pois não agrega valor ao produto final nem é necessário para manter a cadeia produtiva funcionando.

Com base nos resultados obtidos até o momento foram escolhidos três focos para a etapa de otimização: descarregamento no piso de alimentação, processo de pós-adição e linhas de embalagens por cartuchos.

##### **4.4.1. *Descarregamento no piso de armazenagem***

Nos testes anteriores nota-se que o descarregamento de sabão no piso de armazenagem se comporta como o principal gargalo do sistema. Para analisar o

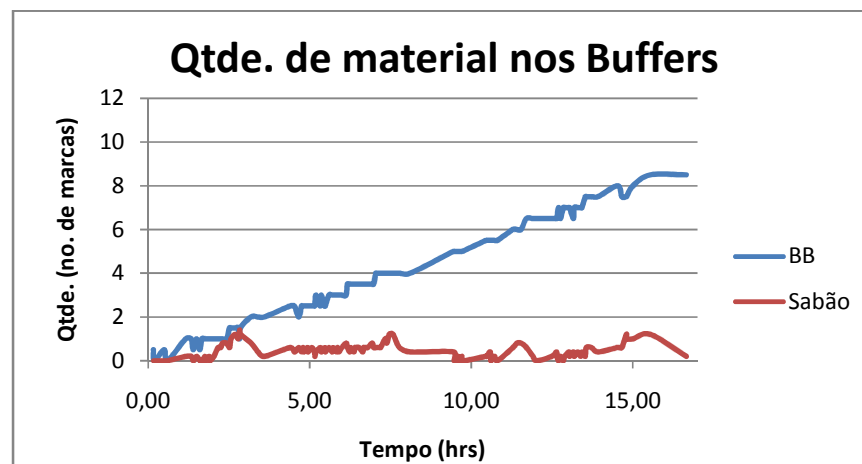


impacto da velocidade de descarregamento na atividade de armazenagem o modelo original foi modificado, adicionando mais um silo de descarregamento de sabão.

Os resultados desta modificação se encontram nas Tabelas 10, 11 e 12 e na Figura 18 obtidas com simulações no ProModel.

**Tabela 10. Quantidade de produtos produzidos**

		Qtde. (paletes)
FP-3	Sabão Tipo 1 (1kg)	60
FP-4	Sabão Tipo 1 (0,5kg)	110
FP-7	Sabão Tipo 2 (1kg)	83
FP-8	Sabão Tipo 2 (0,5kg)	123
FP-11	Sabão Tipo 3 (1kg)	76
FP-12	Sabão Tipo 3 (0,5kg)	93
FP-15	Sabão Tipo 4 (1kg)	73
FP-16	Sabão Tipo 4 (0,5kg)	110
FP-19	Sabão Tipo 5 (1kg)	46
FP-20	Sabão Tipo 5 (0,5kg)	93
<b>Total (paletes)</b>		<b>867</b>
<b>Total (ton)</b>		<b>224,3</b>



**Figura 18. Gráfico com a quantidade de material nos buffers de Base Branca e Sabão produzido**

**Tabela 11. Percentual de utilização das ferramentas**

		Tempo produtivo (%)
CO	<b>Crutcher Ocupado</b>	100%
PAO	<b>Pós-adição Ocupada</b>	98%
SD	<b>Silos de Descarregamento Ocupados</b>	64%
LC	<b>Linha de Embalagem (cartuchos)</b>	84%
LB	<b>Linha de Embalagem (bolsas)</b>	44%
BG	<b>Buggys</b>	12%

**Tabela 12. Tempo de espera do Crutcher e da Pós-adição**

	Espera (min)
<b>Crutcher</b>	4
<b>Pós-adição</b>	10

Pode-se notar que a quantidade total de produto acabado produzido aumenta em 5%. O aumento mostra que, realmente, o descarregamento de sabão era um gargalo no sistema. Apesar disso esse foi um aumento relativamente pequeno, o que mostra que existe outro gargalo.

O baixo tempo de utilização das linhas de embalagem associado ao baixo nível dos *buffers* de sabão em pó mostra que o gargalo não se encontra na embalagem.

Pode-se ver que o tempo de espera tanto do *Crutcher* quanto da Pós-adição estão muito abaixo. Apesar disso o gráfico na Figura 18 indica que o *buffer* de base branca cresce continuamente atingindo o máximo ao final da simulação. Se a simulação continuasse o tempo de espera do *Crutcher* passaria a aumentar, pois o *buffer* de base branca estará cheio.

A partir daí pode-se concluir que o gargalo se encontra na etapa de pós-adição, pois ela não está rápida o suficiente para absorver toda a base branca produzida.

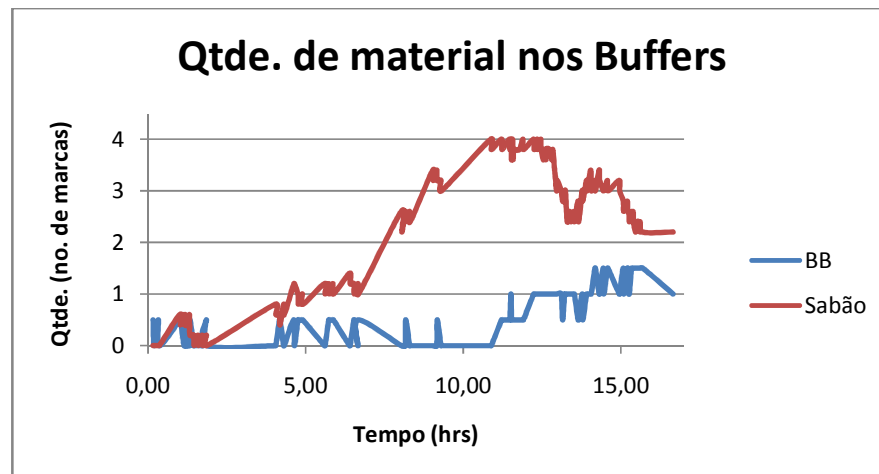
#### 4.4.2. **Processo de Pós-Adição**

Para a próxima análise foi utilizado como base o modelo modificado apresentado na seção anterior (“4.4.1 Descarregamento no piso de armazenagem”). A partir dele foi aumentada a velocidade de produção da etapa de pós-adição em

20%, representando possíveis melhorias no processo. O resultado desta modificação se encontra nas Tabelas 13, 14 e 15 e Figura 19.

**Tabela 13. Quantidade de produtos produzidos**

		Qtde. (paletes)
FP-3	Sabão Tipo 1 (1kg)	60
FP-4	Sabão Tipo 1 (0,5kg)	148
FP-7	Sabão Tipo 2 (1kg)	76
FP-8	Sabão Tipo 2 (0,5kg)	131
FP-11	Sabão Tipo 3 (1kg)	83
FP-12	Sabão Tipo 3 (0,5kg)	97
FP-15	Sabão Tipo 4 (1kg)	100
FP-16	Sabão Tipo 4 (0,5kg)	153
FP-19	Sabão Tipo 5 (1kg)	66
FP-20	Sabão Tipo 5 (0,5kg)	72
<b>Total (paletes)</b>		986
<b>Total (ton)</b>		255,1



**Figura 19. Gráfico com a quantidade de material nos buffers de Base Branca e Sabão produzido**

**Tabela 14. Percentual de utilização das ferramentas**

		Tempo produtivo (%)
CO	Crutcher Ocupado	100%
PAO	Pós-adição Ocupada	92%
SD	Silos de Descarregamento Ocupados	75%
LC	Linha de Embalagem (cartuchos)	95%
LB	Linha de Embalagem (bolsas)	50%
BG	Buggys	51%

**Tabela 15. Tempo de espera do Crutcher e da Pós-adição**

	Espera (min)
Crutcher	0
Pós-adição	83

Novamente é possível notar um aumento na quantidade total de produto acabado, desta vez em 14% com relação à configuração anterior e em um total de 26% com relação à configuração inicial do sistema. Com isso pode-se concluir que a pós-adição também se comportava como um gargalo do sistema.

Nesta nova configuração pode-se perceber que a quantidade de sabão no *buffer* de sabão passou a aumentar, isso indica que as atividades de produção e armazenagem estão otimizadas e não representam limitações para o processo de produção. Também é possível notar que as linhas de embalagem por cartucho estão em seu limite de produção, com um tempo produtivo de 95%, enquanto as linhas de embalagem por bolsas estão sub-utilizadas, com um tempo produtivo de apenas 50%.

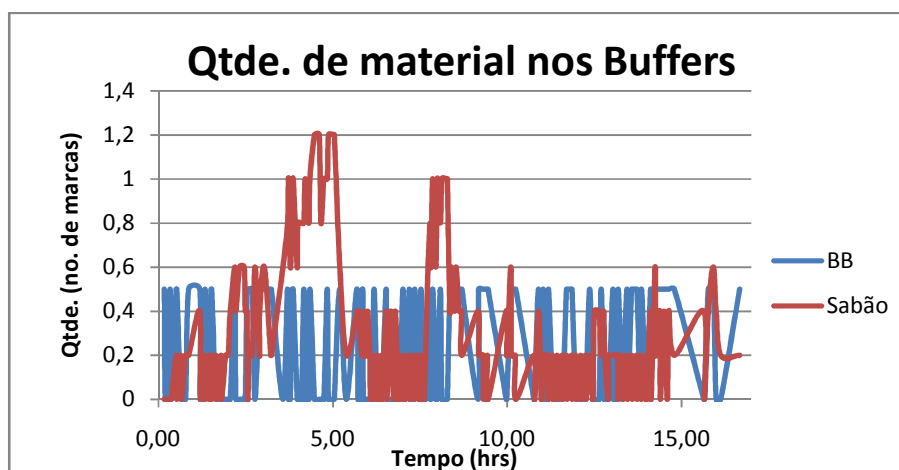
A última etapa do processo de otimização se foca na atividade de embalagem.

#### 4.4.3. ***Linhas de embalagens por cartuchos***

Como último passo no processo de otimização foi decidido trocar uma das linhas de embalagem por bolsa para uma linha de embalagem por cartucho. Os resultados obtidos se encontram nas Tabelas 16, 17 e 18 e Figura 20:

**Tabela 16. Quantidade de produtos produzidos**

		Qtde. (paletes)
FP-3	Sabão Tipo 1 (1kg)	83
FP-4	Sabão Tipo 1 (0,5kg)	114
FP-7	Sabão Tipo 2 (1kg)	150
FP-8	Sabão Tipo 2 (0,5kg)	216
FP-11	Sabão Tipo 3 (1kg)	50
FP-12	Sabão Tipo 3 (0,5kg)	76
FP-15	Sabão Tipo 4 (1kg)	83
FP-16	Sabão Tipo 4 (0,5kg)	123
FP-19	Sabão Tipo 5 (1kg)	60
FP-20	Sabão Tipo 5 (0,5kg)	102
Total (paletes)		1057
Total (ton)		274,1



**Figura 20. Gráfico com quantidade de material nos buffers de Base Branca e Sabão produzido**

**Tabela 17. Percentual de utilização das ferramentas**

		Tempo produtivo (%)
CO	Crutcher Ocupado	100%
PAO	Pós-adição Ocupada	94%
SD	Silos de Descarregamento Ocupados	77%
LC	Linha de Embalagem (cartuchos)	83%
LB	Linha de Embalagem (bolsas)	55%
BG	Buggys	8%

**Tabela 18. Tempo de espera do Crutcher e da Pós-adução**

	Espera (min)
<b>Crutcher</b>	0
<b>Pós-adução</b>	31

Com esta nova mudança houve um acréscimo na quantidade total de produto acabado em mais 7%, aumentando novamente a produtividade do conjunto.

Adicionalmente pode-se notar que foi utilizado um número relativamente pequeno de *buggys*, tempo produtivo de 8%, e que os *buffers*, tanto de sabão quanto de base branca se mantiveram em um nível baixo durante toda a simulação. Isso mostra que, com esta configuração, seria possível reduzir o número de *buggys* e o tamanho dos *buffers* sem prejudicar o desempenho total do sistema.

## 5. Conclusão

Neste projeto foram construídos modelos em PFS/MFG de um sistema de produção. Como estudo de caso foi utilizado o sistema de produção de sabão em pó de uma fábrica da “Procter & Gamble S/A”. Esses modelos foram analisados e simulados com ajuda dos softwares HPSim e Promodel. A partir destas simulações os modelos foram validados e foram identificados potenciais problemas nos diferentes processos e o desempenho total do sistema pôde ser otimizado.

Dentro dos objetivos previstos para este trabalho pode-se afirmar que todos foram alcançados, incluindo a otimização do sistema de produção.

Apesar dos resultados satisfatórios é importante apontar as considerações adotadas durante a construção do modelo: a variedade de sabões e de produtos finais foi diminuída, de modo a gerar um modelo simples, mas que representasse de maneira fiel o sistema real, o número de linhas de embalagem foi diminuído de maneira proporcional; não foram considerados tempos necessários para manutenção de equipamentos que teriam certamente influência na eficiência do sistema; não foi levada em conta a dinâmica de chegada de matéria-prima ao sistema, por não fazer parte do escopo do projeto.

Um próximo passo para este trabalho seria rever estas considerações do modelo. Em especial seria interessante implementar a dinâmica de chegada de matéria-prima no sistema, estudando qual seria a melhor configuração para o tempo de entrega, a quantidade de material entregue e o tamanhos dos *buffers* de matéria-prima.

## 6. Referências Bibliográficas

HAMMER, M. and CHAMPY, J. **Re-engineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution**. HarperBusiness. 2001.

HASEGAWA, K. and TAKAHASHI, K. **Programmable Controller Based on MFG**, Proceedings of SICE'82, p. 109-110, Tokyo, 1982.

INO, K. **Modelagem e Análise de Sistemas de Transporte e/ou Movimentação de Materiais em Ambiente Industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

KIM, S.; GUZIDE, O. and COOK, S. **Towards an Optimal Network Topology in Wireless Sensor Networks**. Department of Computer Science, Mathematics and Engineering, Shepherd University, 2009

MATSUSAKI, C. T. M. **Redes de F-MFG (Mark Flow Graph) e sua Aplicação no Projeto de Sistemas Antropocêntricos**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MIYAGI, P. E. **Controle Programável – Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos**. Editora Edgard Blücher, São Paulo. 1996.

MIYAGI, P. E. **Introdução à simulação discreta**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Apostila do curso Modelagem e Controle de Sistemas Discretos. São Paulo. 2004.

PETERSON, J. L. **Petri Net Theory and the Modeling of Systems**. Prentice-Hall, Englewoods Cliffs. 1981.

PMI/PMBOK. **Project Management Body of Knowledge**. PMBOK® Guide. 2000.



**Promodel Optimization Software Suite.** Disponível em:  
<http://www.promodel.com/products/promodel/>. Acesso em 20/05/2010.

THE SOAP AND DETERGENT ASSOCIATION - SDA. **Soaps and Detergents.**  
Information Applications, Inc. 1981.

## Anexo I: Cronograma

A Tabela a seguir apresenta o cronograma desenvolvido e seguido durante a execução do projeto.

	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Estudo preliminar do sistema de produção												
Especificação do sistema												
Modelo conceitual (PFS)												
Modelo detalhado (MFG)												
Análise estrutural e qualitativa dos processos												
Coleta de dados específicos para o projeto												
Modelos para simulação (HPSim, Promodel)												
Simulação e validação do modelo												
Análise funcional e quantitativa dos processos												

## Anexo II: Modelo em Rede de Petri

Modelo em rede de Petri, construído no HPSim e utilizado na simulação do sistema.

