

ANÁLISE DO IMPACTO DAS PARADAS DE MÁQUINA EM UMA EMPRESA FARMACÊUTICA POR MEIO DA SIMULAÇÃO

Marina Santos Mello¹
José Arnaldo Barra Montevechi²
Rafael de Carvalho Miranda³

RESUMO: O interesse pelo uso da abordagem de simulação de processos vem crescendo ultimamente, devido às suas vantagens econômicas e retrato cada vez mais fiel aos cenários reais. Dessa forma, este trabalho visa o desenvolvimento de um modelo de simulação que retrate o comportamento de uma linha de embalagem de uma empresa farmacêutica. Com o objetivo de se analisar o impacto dos tempos de paradas de máquina no índice de produtividade. Para isto, foi utilizado o método de pesquisa modelagem e simulação. O desenvolvimento de um modelo conceitual, a coleta e análise estatística dos dados referentes à linha de embalagem. O desenvolvimento do modelo computacional e a análise de experimentos na modelagem elaborada transformaram-se em uma importante ferramenta gerencial. A qual pode ser utilizada como auxílio aos responsáveis por tomadas de decisão, visando a escolha de ações preventivas e corretivas mais adequadas ao sistema. Além disso, as possíveis soluções testadas por simulação não implicam em gastos de implementação e não há necessidade de comprometimento ou paralisação da linha.

Palavras-chave: Simulação a eventos discretos. Modelagem e simulação. Empresa farmacêutica.

1 INTRODUÇÃO

A competição mundial na indústria farmacêutica e as demandas crescentes por medicamentos, a preços cada vez mais acessíveis a população, chamou a atenção desta indústria sobre a necessidade de eficiência em seu processo de fabricação (PAPAVASILEIOU et al., 2007).

Em busca de auxílio nas tomadas de decisões, tem-se utilizados cada vez mais procedimentos de modelagem, análise e projeto de sistemas. Nessa vertente, cresce o destaque à simulação computacional a eventos discretos, de forma a se tornar possível a avaliação de impactos de mudanças de parâmetros no desempenho do processo.

¹ Engenheira de Produção, IEPG, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Pinheirinho, Itajubá – Minas Gerais, Brasil. E-mail: marinamello15@yahoo.com.br.

² Doutor em Engenharia Mecânica, IEPG, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Pinheirinho, Itajubá – Minas Gerais, Brasil. E-mail: montevechi@unifei.edu.br.

³ Mestre em Engenharia de Produção, IEPG, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Pinheirinho, Itajubá – Minas Gerais, Brasil. E-mail: mirandaprod@yahoo.com.br.

Segundo Greasley (2003), a simulação pode ser utilizada para comunicar para os diretores, clientes e funcionários o “antes” e o “depois” da implantação de um novo projeto. Pode ser usada também para treinar funcionários diante de uma nova operação do sistema e permitir que eles criem uma visão geral dos benefícios da mudança a partir da visão do modelo em execução.

Com o aprimoramento tecnológico, crescimento na aceitação do mercado e consequente redução no preço dos computadores na década de 1970, a simulação começou a se aproximar do que se conhece atualmente. Segundo Kelton, Sadowski e Sturrock (2007) foi nesta época também que a simulação passou a fazer parte dos currículos de Engenharia de Produção e Pesquisa Operacional. Porém, a simulação se estabeleceu somente na década de 1990, quando sua utilização se expandiu por pequenas empresas no intuito de se determinar soluções nos primeiros estágios de projetos.

Dessa forma, este trabalho visa o desenvolvimento de um modelo de simulação que retrate o comportamento de uma linha de embalagem de uma grande empresa farmacêutica, com o objetivo de se analisar o impacto dos tempos de paradas de máquina no índice de produtividade e, assim, criar uma importante ferramenta gerencial, possibilitando a escolha de ações preventivas e corretivas mais adequadas ao sistema. Foi utilizado, portanto, o método de pesquisa “modelagem e simulação”.

Primeiramente, será apresentada uma fundamentação teórica para dar embasamento ao assunto tratado. Posteriormente será abordada a metodologia proposta, indicando o método de pesquisa, as etapas de uma simulação e o software de simulação utilizado nesta pesquisa. Em seguida, será feito o mapeamento do processo e sua validação. A simulação será então executada e validada. Em seguida, serão analisados os resultados, o que permitirá o direcionamento das ações preventivas e corretivas no sistema em questão. Para fechamento, será apresentada a conclusão deste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta a fundamentação teórica que sustenta o trabalho desenvolvido neste artigo. Serão apresentados os fundamentos básicos para modelagem e simulação e as características principais da indústria farmacêutica, contemplando trabalhos, que como este, também utilizaram a simulação neste tipo de indústria.

2.1 Fundamentos para modelagem e simulação

Para Shannon (1998), simulação é o “processo de fazer um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de compreender o comportamento do sistema e/ou avaliar estratégias para a operação deste sistema”. Segundo este autor, existem as seguintes vantagens para o uso da simulação:

- Possibilidade de testar novos layouts, novos projetos, etc., sem comprometer recursos para a implantação;
- Pode ser utilizada para explorar novas políticas de estoque, procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxo de informações sem interrupção do sistema real;
- Permite o controle do tempo, uma vez que se pode executar o modelo do sistema por vários meses ou anos em questão de minutos, permitindo uma rápida análise ao longo do tempo ou desacelerar um fenômeno para compreender melhor;
- Permite identificar gargalos no fluxo de informações, materiais ou produtos e testar opções para aumentar a taxa de fluxo;
- Permite adquirir conhecimento de como um sistema modelado realmente trabalha e compreender quais variáveis são importantes para seu desempenho.

O método de modelagem e simulação tem sido empregado com sucesso em áreas bastante vastas, que abrangem sistemas logísticos, sistemas de manufatura, sistemas de serviços em saúde, serviços em geral e sistemas militares.

Modelos de simulação de sistemas a eventos discretos são aqueles que mudam suas variáveis de estado em pontos discretos no tempo, acionados pela ocorrência de eventos (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2004).

Uma célula de manufatura é um exemplo de sistema a eventos discretos. A variável de estado, *status* de utilização de uma determinada máquina (vazio, ocupado ou quebrada), muda somente quando um dos seguintes eventos acontece isoladamente: ocorre a quebra da máquina, ou uma peça entra na máquina para ser processada, ou uma peça sai da máquina após processamento, ou ainda é solicitada a parada da máquina para a manutenção preventiva.

2.2 Indústria farmacêutica e projetos simulados

Segundo Besseris (2012), a necessidade de se incrementar o desempenho da indústria, associada a busca constante pela redução de custos, estimulou a utilização da simulação nas empresas modernas, e isso não foi diferente na indústria farmacêutica.

Estimulada pela competição mundial e pela necessidade de suprir mercados cada vez maiores, as indústrias farmacêuticas tiveram que se adequar a essa nova realidade, buscando melhorias produtivas visando sua eficiência, redução de custos e aumento de qualidade (TOUMI et al., 2010).

Para Mesquita e Santoro (2004), a primeira etapa da cadeia produtiva na indústria farmacêutica consiste na fabricação do princípio ativo do medicamento que será produzido. Este item constitui o principal insumo dos laboratórios, mas não é o único. Somam-se a ele, outros insumos e materiais, como os necessários a seu correto acondicionamento e embalagem. Ainda segundo os autores, cada família de produto pode ser produzida em diferentes quantidades, dosagens, etc. Devido à necessidade de controle e às características particulares desta indústria, este setor geralmente passa por regulamentações particulares por órgãos governamentais.

Na composição dos custos de produção dessa indústria, além dos custos tradicionais de fabricação e logística, somam-se os custos de pesquisa e desenvolvimento (MESQUITA; SANTORO, 2004). Para Sanvito (2012), devido a estes custos, um novo medicamento pode custar de US\$ 800 milhões a mais de um bilhão de dólares. O autor, ainda afirma que tais custos podem estar superestimados, devido a seu alto preço durante a vigência da patente.

Tal situação fez com que nos últimos anos, o uso de modelos de processos na indústria farmacêutica crescesse drasticamente, e tem permeado toda a cadeia produtiva da indústria farmacêutica, desde as primeiras etapas de pesquisa e desenvolvimento até a distribuição (KREMER; HANCOCK, 2006).

Na busca por processos produtivos mais eficientes, o uso da simulação a eventos discretos na indústria farmacêutica vem ganhando destaque, como se pode observar por meio de vários trabalhos disponíveis na literatura (ESKANDARI; BABOLMORAD; FARROKHANIA, 2013; HOQUE; PAUL, 2011; STROHHECKER; SIBBEL; DICK, 2014; PAPAVALASILEIOU et al., 2007; PETRIDES et al., 2014).

Dengiz e Belgin (2014) enfatizam que, a simulação serve como uma poderosa ferramenta para solução de problemas enfrentados em sistemas estocásticos, ao mesmo tempo

em que permite investigar o comportamento de diferentes problemas reais, de modo a operacionalizar a tomada de decisão sobre várias condições.

Devido a estas características, o uso da simulação em uma indústria, onde a busca pela eficiência se torna crítica, pode ser de fundamental importância na busca por melhores processos produtivos.

3 MÉTODO DE PESQUISA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Os modernos sistemas de manufatura se tornaram complexos, uma vez que consistem de muitas operações discretas que se caracterizam por serem de natureza aleatória, dinâmica e não linear (O’KANE; SPENCELEY; TAYLOR, 2000). Neste caso, os resultados de uma pesquisa quantitativa podem ser obtidos via simulação, ao invés da abordagem matemática, caracterizando o método de pesquisa modelagem e simulação (MORABITO; PUREZA, 2010).

No método de pesquisa modelagem e simulação, o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis, mas não na realidade” (MARTINS, 2010). O mesmo autor afirma que isto é feito em um modelo de pesquisa, que é uma abstração da realidade, podendo haver ou não o uso de computadores para manipular as variáveis do modelo. Chung (2004) também afirma que o método de modelagem e simulação envolve a criação de um modelo de um sistema físico e experimentação neste modelo.

De acordo com Garza-Reyes et al. (2010), simulação é uma técnica experimental baseada em um modelo computacional, o qual pode trazer mais benefícios em comparação com a experimentação em sistemas reais. Os mesmos autores afirmam que na simulação, o sistema modelado pode ser examinado sob condições controladas e selecionadas, as quais são claramente impraticáveis na maioria dos sistemas reais, e sem o risco para a viabilidade do sistema real que tais experimentos poderiam causar.

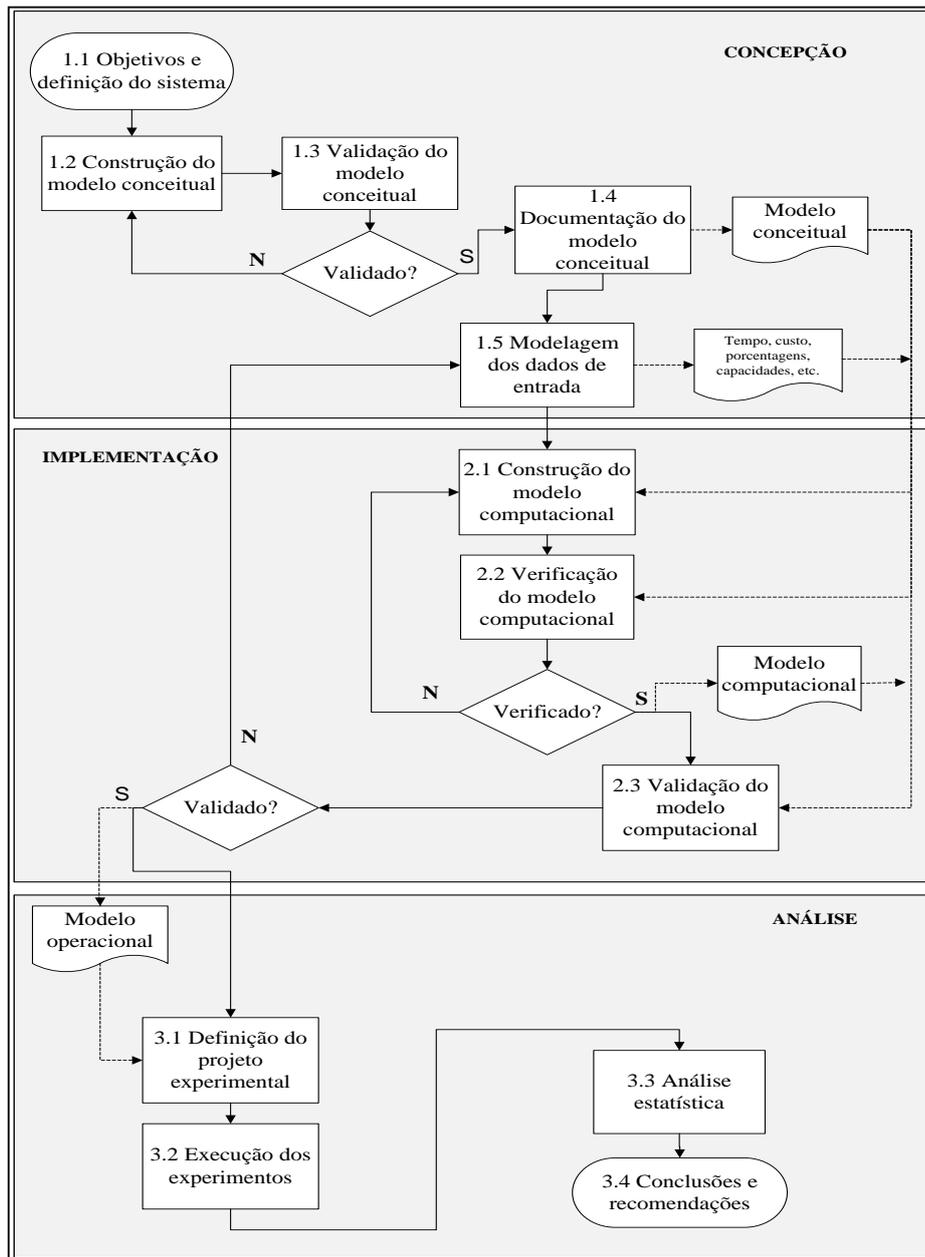
Kelton, Sadowski e Sturrock (2007) afirmam que a simulação é muito mais que apenas construir um modelo e conduzir um experimento estatístico. Os autores se justificam, ressaltando que existe muito mais para ser aprendido em cada passo de um projeto de simulação, e as decisões que são tomadas ao longo do projeto podem afetar a significância dos resultados.

Contextualizado o método de pesquisa que suporta a aplicação deste trabalho, a próxima seção apresentará detalhadamente os passos necessários para condução de um projeto de simulação.

3.1 Etapas de um projeto de simulação

Montevechi et al. (2010) propuseram um fluxograma para representar a lógica de etapas a serem seguidas em um projeto de simulação. Tal estrutura é apresentada na Figura 1. Segundo a visão dos autores o método é dividido em três etapas: Concepção, Implementação e Análise. Estes passos são detalhados na sequência.

Figura 1 – Passos para um projeto de simulação



Fonte: Adaptado de Montevechi et al. (2010)

Concepção: definição do problema, criação e validação do modelo conceitual, obtenção de dados necessários e preparação dos dados de entrada.

O modelo conceitual é construído com o objetivo de representar a essência do sistema existente, facilitando a construção do modelo computacional de simulação. Algumas técnicas utilizadas para construir o modelo conceitual são: mapeamento *Lean* (ABDULMALEK; RAJGOPAL, 2007), *Activity Cycle Diagram – ACD* (CHWIF, PAUL e BARRETO, 2006), mapa de processos (GREASLEY, 2006) e *Integrated Definition methods-Simulation – IDEF-SIM* (LEAL; ALMEIDA; MONTEVECHI, 2008).

Os dados de entrada devem ser coletados e ajustados a uma distribuição de probabilidade que alimenta o modelo computacional. É importante citar que o modelo de simulação será tão confiável quanto melhor forem os dados que o abastecem.

Implementação: transformação do modelo conceitual em modelo computacional, verificação e validação.

O modelo conceitual é a base para a programação do modelo computacional. Este deve passar por dois procedimentos fundamentais: a validação e a verificação. Validação pode se referir ao modelo conceitual, ou seja, consiste em aceitar ou não o modelo como uma boa representação do sistema real. Existe também a validação operacional atribuída ao modelo computacional, que consiste em se utilizar técnicas estatísticas, para comparar os dados reais e simulados. Por sua vez, a verificação consiste em se comprovar que a tradução do modelo conceitual para o modelo computacional foi feita fiel e corretamente.

Análise: experimentação com o modelo verificado e validado, planejamento experimental final, análise, interpretação dos dados de saída.

Sanchez (2007) afirma que o processo de construir, verificar e validar um modelo de simulação pode ser árduo, mas uma vez que ele está completo, então é o momento de se ter o modelo trabalhando para o modelador.

3.2 Promodel®

Para o estudo desenvolvido neste trabalho, o simulador escolhido foi o Promodel®, versão 8.6. Banks et al. (2005) apresentam algumas características para este simulador:

- A construção de modelos é feita graficamente;
- Permite utilização de rotinas de programação externa desenvolvidas em C/C++;
- Possui animação em duas e três dimensões;
- Possui capacidade de avaliação de custos (sistema ABC);
- Permite a utilização de distribuições estatísticas;

- Possui uma grande quantidade de recursos gráficos para a visualização de resultados;
- Juntamente com o Promodel® existe um módulo chamado SimRunner®, que permite a otimização das variáveis simuladas.

Ressalta-se ainda a capacidade de comunicação do *Promodel*® com o *Excel*®, permitindo que o *Excel*® comande a execução do *Promodel*®, exportando ou importando dados.

4 APLICAÇÃO PRÁTICA DO MÉTODO

Nesta seção serão descritos todos os passos apresentados em Montevechi et al. (2010), para construção do modelo computacional e auxílio a tomada de decisão em uma indústria farmacêutica.

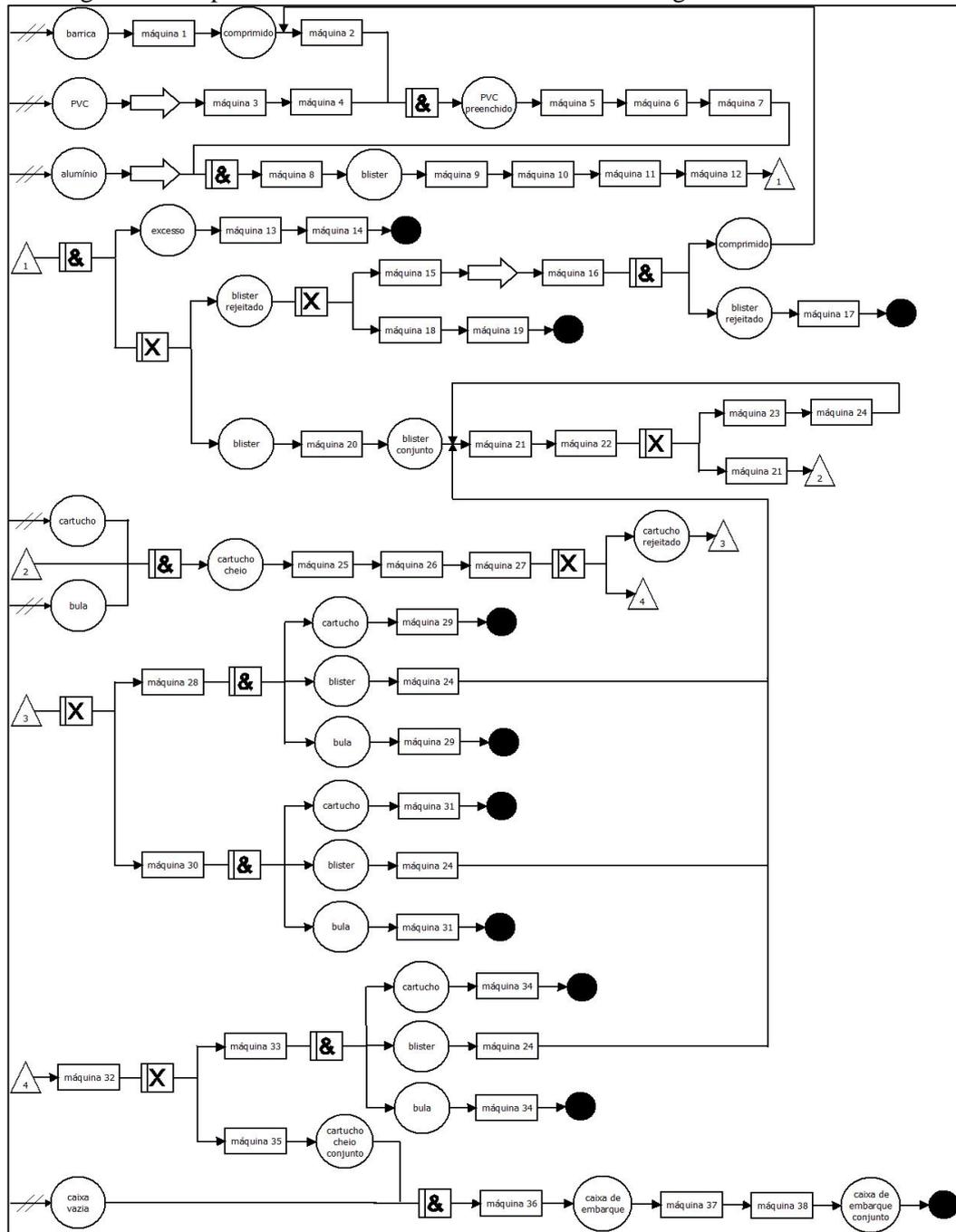
4.1 Objetivos e definição do sistema

O sistema a ser simulado trata de uma das linhas de embalagem de uma grande empresa farmacêutica. Esta linha é responsável por apenas um tipo de produto, de forma que não são realizados *setups* para troca de produto. Dessa forma, este trabalho visa o desenvolvimento de um modelo de simulação que retrate o seu comportamento, com o objetivo de se analisar o impacto dos tempos de paradas de máquina no índice de produtividade e, assim, criar uma importante ferramenta gerencial, possibilitando a escolha de ações preventivas e corretivas mais adequadas ao sistema.

4.2 Construção do modelo conceitual

Será utilizada neste trabalho a técnica IDEF-SIM para a representação de modelo conceitual de simulação. Esta técnica foi proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008) e tem como característica a identidade de sua lógica de aplicação com a lógica utilizada na simulação a eventos discretos. Logo, ao ser utilizada esta técnica, são manipulados elementos que também são requisitados na fase de programação do modelo computacional. A Figura 2 apresenta a versão final do modelo conceitual.

Figura 2 – Mapeamento IDEF-SIM do sistema de embalagem da linha estudada



Fonte: Elaborado pelos autores

O sistema modelado pode ser dividido em 4 etapas, descritas a seguir. Por questões de confidencialidade não serão apresentados os nomes das máquinas e etapas do processo real.

4.2.1 Etapa 1

A barrica é fixada na Máquina 1, de forma que os comprimidos sejam direcionados à Máquina 2.

4.2.2 Etapa 2

O material PVC é levado à Máquina 3 e, posteriormente, chega à Máquina 4. Os comprimidos preenchem o PVC e o conjunto passa então pelas Máquinas 5, 6 e 7. Uma folha de alumínio se junta ao PVC preenchido e ambos passam pela Máquina 8, formando o blister, que passa pelas Máquinas 9, 10, 11 e 12. São formados o excesso e os *blisteres* conformes ou rejeitados. O excesso segue pela Máquina 13 e chega à Máquina 14.

Os *blisteres* rejeitados podem ter 2 destinos: ou passam pelas Máquinas 18 e 19 ou chegam na Máquina 15, são transportados para a Máquina 16, a partir da qual os comprimidos são levados novamente à Máquina 2 e os *blisteres* rejeitados vão para a Máquina 17.

4.2.3 Etapa 3

Os *blisteres* passam pela Máquina 20, formando um conjunto de *blisteres* que segue pelas Máquinas 21 e 22. Caso haja problema com o número correto de *blisteres*, eles são levados às Máquinas 23 e 24 e retornam à Máquina 21. Não havendo este problema, o conjunto de *blisteres* segue pela Máquina 21, onde se une com cartuchos e bulas e forma-se o cartucho cheio. Este passa pelas Máquinas 25, 26 e 27.

Os cartuchos rejeitados podem seguir 2 caminhos. No primeiro, passam pela Máquina 28, de onde o cartucho e a bula vão para a Máquina 29 e o blister vai para a Máquina 24 e depois para a Máquina 21. No segundo, seguem pela Máquina 30, de onde o cartucho e a bula vão para a Máquina 31 e o blister vai para a Máquina 24 e depois para a Máquina 21.

4.2.4 Etapa 4

Os cartuchos cheios passam pela Máquina 32 e podem também seguir por 2 caminhos. No primeiro, vão para a Máquina 33, de onde o cartucho e a bula passam pela Máquina 34 e o blister vai para a Máquina 24 e depois para a Máquina 21. No segundo, vão para a Máquina 35, é formado um conjunto de cartuchos cheios que se une com caixas vazias e passam pela Máquina 36, constituindo a caixa de embarque. Esta segue pelas Máquinas 37 e 38, resultando em conjuntos de caixas de embarque.

4.3 Validação do modelo conceitual

Uma vez construído o modelo conceitual, foi realizada uma reunião com o gerente e o supervisor da área. Ambos não conheciam a técnica utilizada, de maneira que foi interessante e necessária a descrição da função de cada símbolo utilizado, para permitir uma maior

familiaridade com a técnica e um maior entendimento do processo indicado pelo modelo. Após entenderem e apreciarem a técnica, o gerente e o supervisor da área validaram o modelo.

4.4 Modelagem dos dados de entrada

Nesta seção serão apresentados os passos necessários para a obtenção dos dados que alimentarão o modelo computacional, que irá representar o sistema real estudado. Destacam-se aqui as atividades de cronoanálises realizadas na linha de produção, bem como as análises que permitiram identificar as distribuições de probabilidades relacionadas às máquinas e deslocamentos de produtos no sistema. Apresentam-se também outros dados importantes e necessários a construção do modelo computacional.

4.4.1 Tempos das atividades e de transportes

Foi realizada ao longo de duas semanas, a coleta dos tempos referentes a cada atividade presente na linha e dos tempos referentes aos transportes, que foram considerados relevantes.

Para a determinação de quantas vezes seria necessário se cronometrar o mesmo elemento para posterior análise estatística, foram definidos dois parâmetros: Nível de Confiança de 95% e Erro Relativo de $\pm 5\%$. Dessa forma, com 95% de probabilidade, a média dos valores observados (amostra) para o elemento não diferirá mais de 5% (para mais ou para menos) do valor verdadeiro para a duração do elemento.

Foi coletada então uma amostra piloto, para que seus valores fossem substituídos na seguinte Equação (1).

$$n = \left(\frac{Z * S}{e} \right)^2 \quad (1)$$

Sendo:

n = tamanho da amostra necessário;

Z = número de desvios em uma normal para obter a confiabilidade necessária;

S = desvio padrão da amostra;

e = erro máximo aceitável.

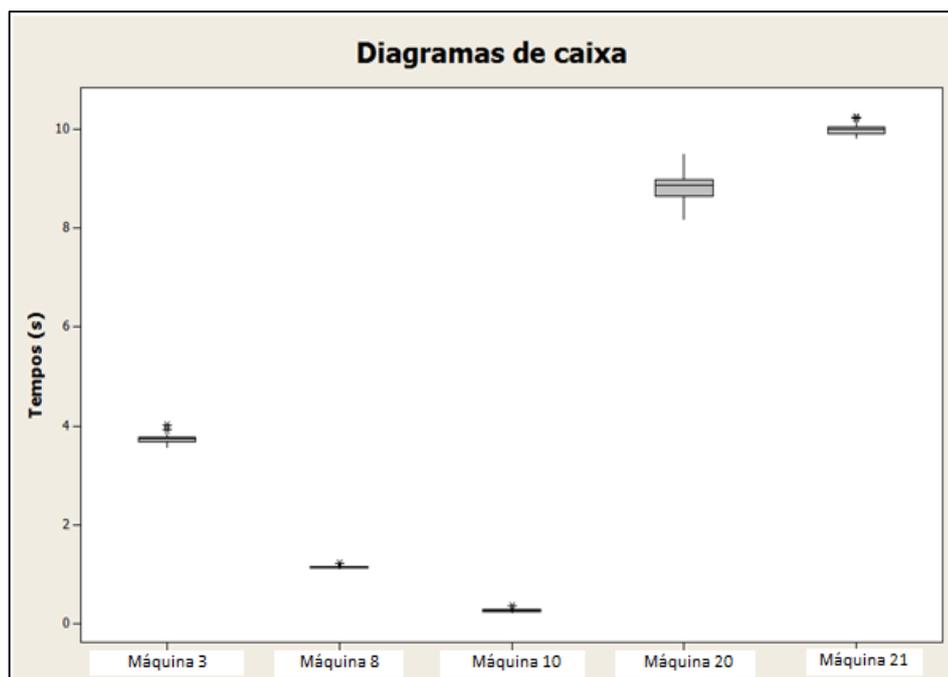
Tem-se que, para o Nível de Confiança adotado de 95%, $Z = 1,96$. E que o máximo erro aceitável “e” é o resultado do produto entre os valores de Erro Relativo e Média.

Assim sendo, foram substituídos os valores da amostra com o auxílio do software Excel® e encontrou-se o número de tomadas de tempo necessário para uma correta análise dos tempos de cada atividade.

Após a cronometragem, foi realizada uma análise estatística destes dados, por meio do software Minitab®. Primeiramente foram construídos diagramas de caixas (*box plots*) para a identificação de possíveis *outliers* na amostra. Ao ser verificada a existência de um *outlier*, a ocorrência foi analisada e, nos casos em que poderia haver uma causa especial responsável, os valores foram eliminados.

A Figura 3 mostra esta etapa para algumas das atividades da linha de embalagem estudada. O mesmo procedimento foi replicado para as demais atividades. Os *outliers* foram analisados e chegou-se à conclusão de que a necessidade de eliminação de tais valores seria adequada apenas nas seguintes atividades: “Máquina 3”, “Máquina 10” e “Máquina 36”.

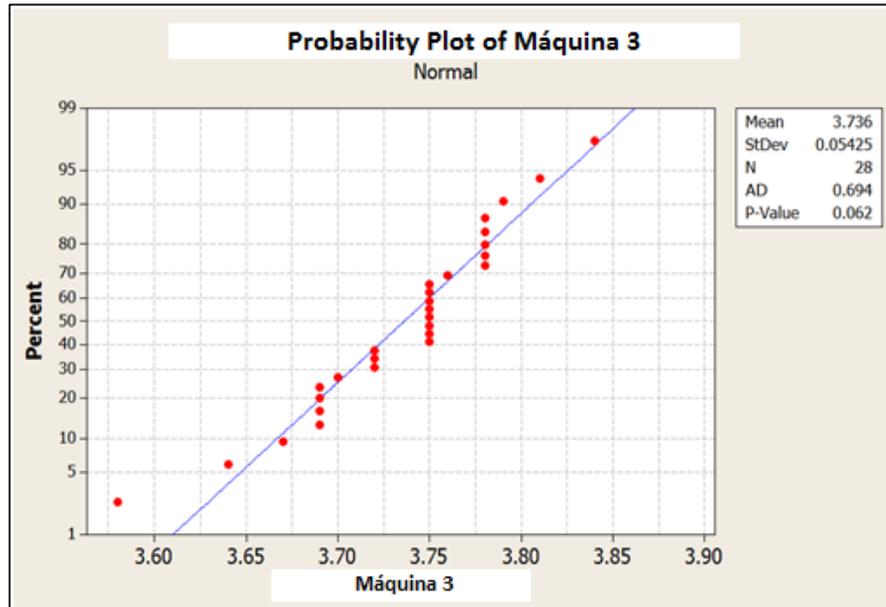
Figura 3 – Diagramas de caixa para atividades da linha de embalagem estudada



Fonte: Elaborado pelos autores

Retirados os *outliers* identificados como valores não usuais que interfeririam no resultado final, foi feito um teste de normalidade (*Anderson-Darling Normality test*) para cada amostra. A Figura 4 mostra os resultados deste teste e também as estatísticas básicas para a amostra referente à atividade “Máquina 3”. Neste caso, o *p-value* do teste foi de 0,062. Como este valor é maior que o nível de significância adotado de 0,05, aceita-se a hipótese de que a amostra pode ser representada por uma distribuição normal.

Figura 4 – Teste de normalidade aplicado à atividade “Máquina 3”



Fonte: Elaborado pelos autores

Os testes de normalidade foram aplicados às demais atividades e aos transportes da linha. A Tabela 1 apresenta a distribuição de probabilidades ajustada para as máquinas da linha, além de seus respectivos parâmetros.

Tabela 1 – Distribuição de probabilidades para atividades da linha de embalagem estudada

Atividade	Distribuição de probabilidades (tempo em segundos)
Máquina 3	Normal (3,736; 0,05425)
Máquina 8	Normal (1,151; 0,03052)
Máquina 9	Normal (1,151; 0,03052)
Máquina 10	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 11	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 12	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 16	Normal (1,416; 0,02063)
Máquina 20	Normal (8,825; 0,3204)
Máquina 21	Normal (10,01; 0,1067)
Máquina 24	Normal (8,825; 0,3204)
Máquina 25	Normal (0,8833; 0,06078)
Máquina 26	Normal (0,729; 0,03796)
Máquina 27	Normal (9,643; 0,04374)
Máquina 32	Normal (0,527; 0,05182)
Máquina 36	Normal (18,08; 0,08469)
Máquina 37	Normal (4,842; 0,5414)

Na Tabela 2 pode-se verificar a distribuição de probabilidade para os transportes realizados entre as máquinas, bem como os parâmetros que alimentaram a simulação da linha.

Tabela 2 – Distribuição de probabilidades para transportes da linha de embalagem estudada

Transporte	Distribuição de probabilidades (tempo em segundos)
Entrada de pvc – Máquina 3	Normal (31,18; 0,5988)
Máquina 3 – Máquina 4	Normal (15,34; 0,6026)

Transporte	Distribuição de probabilidades (tempo em segundos)
Máquina 4 – Máquina 5	Normal (2,788; 0,2137)
Máquina 5 – Máquina 6	Normal (2,788; 0,2137)
Máquina 6 – Máquina 7	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 7 – Máquina 8	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 8 – Máquina 9	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 9 – Máquina 10	Normal (12,18; 0,3420)
Máquina 10 – Máquina 11	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 11 – Máquina 12	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 12 – Máquina 13	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 12 – Máquina 15	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 12 – Máquina 18	Normal (0,2684; 0,02218)
Máquina 12 – Máquina 20	Normal (1,596; 0,08881)
Máquina 15 – Máquina 16	Normal (62,78 ; 10,52)
Máquina 16 – Máquina 2	Normal (14,82; 2,503)
Máquina 22 – Máquina 28	Normal (34,26 ; 0,2147)
Máquina 22 – Máquina 25	Normal (23,43; 0,2432)
Máquina 28 – Máquina 24	Normal (30,73; 4,940)
Máquina 30 – Máquina 24	Normal (32,88; 5,285)
Máquina 32 – Máquina 35	Normal (4,290; 0,2697)
Máquina 33 – Máquina 24	Normal (32,59; 5,472)

Os dados coletados referentes aos tempos de processamento de máquinas e tempos de transporte são de fundamental importância para elaboração do modelo computacional, bem como para sua posterior validação.

4.4.2 Dados Estatísticos do Processo

A construção do modelo computacional requer também dados estatísticos sobre o desempenho do processo do sistema. Com dados de entrada devidamente preparados e definido o modelo conceitual, o próximo passo é a fase de implementação.

4.4.2.1 Rejeitos

As máquinas possuem sistemas computadorizados, que contabilizam a quantidade de material destinado aos compartimentos de rejeito. Ao longo de três semanas trabalhou-se com os dados extraídos de tal sistema. Esses dados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Porcentagem de entidades que são direcionadas aos rejeitos

Porcentagem de entidades que são direcionadas aos rejeitos		
Entidade	Local	Porcentagem
Blister	Máquina 15	0,735%
Blister	Máquina 18	4,165%
Blister	Máquina 28	3,5%
Cartucho	Máquina 28	0,175%
Cartucho	Máquina 30	0,175%
Cartucho	Máquina 33	4,3%

De posse dos dados apresentados na Tabela 3, o modelo de simulação desenvolvido pode contemplar a perdas do sistema, facilitando sua validação, bem como trazendo maior confiabilidade ao modelo.

4.4.2.2 Tempos de Parada

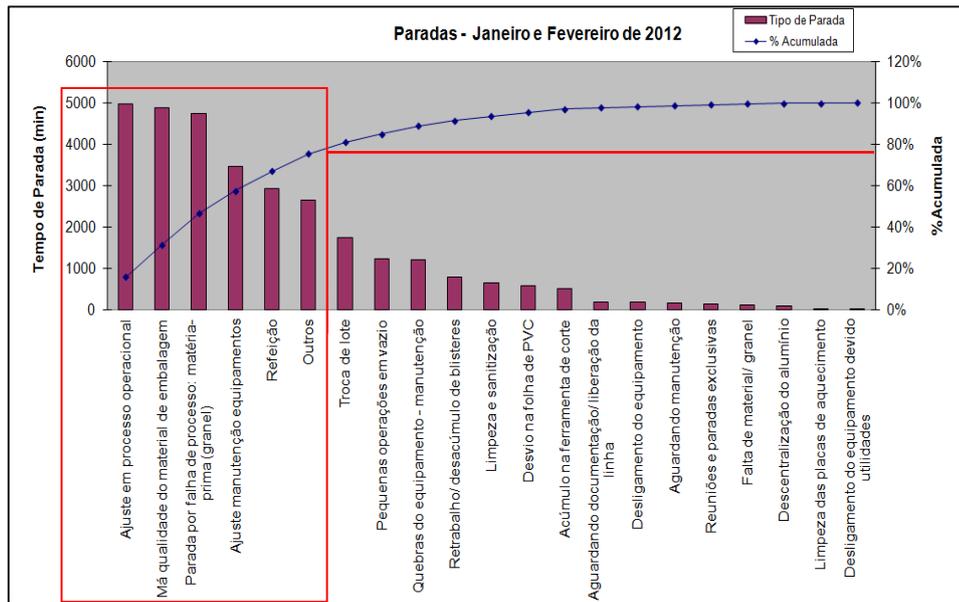
Tem-se, como histórico, os tempos totais mensais de parada de máquina e suas respectivas causas. Foram coletados os dados relativos aos meses de Janeiro e Fevereiro de 2012. Tais valores foram analisados e estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tempos totais de parada nos meses de Janeiro e Fevereiro de 2012

Paradas – 2012			
Tipo de parada	Tempo de parada (min)	%	% Acumulada
Ajuste em processo operacional	4985,00	15,91%	15,91%
Má qualidade do material de embalagem	4875,00	15,56%	31,48%
Parada por falha de processo: matéria-prima (granel)	4735,00	15,12%	46,59%
Ajuste manutenção equipamentos	3455,00	11,03%	57,62%
Refeição	2940,00	9,39%	67,01%
Outros	2640,00	8,43%	75,43%
Troca de lote	1750,00	5,59%	81,02%
Pequenas operações em vazio	1240,00	3,96%	84,98%
Quebras do equipamento – manutenção	1220,00	3,89%	88,87%
Retrabalho/ desacúmulo de <i>blisteres</i>	795,00	2,54%	91,41%
Limpeza e sanitização	660,00	2,11%	93,52%
Desvio na folha de pvc	590,00	1,88%	95,40%
Acúmulo na ferramenta de corte	510,00	1,63%	97,03%
Aguardando documentação/ liberação da linha	195,00	0,62%	97,65%
Desligamento do equipamento	175,00	0,56%	98,21%
Aguardando manutenção	165,00	0,53%	98,74%
Reuniões e paradas exclusivas	140,00	0,45%	99,19%
Falta de material/ granel	120,00	0,38%	99,57%
Descentralização do alumínio	95,00	0,30%	99,87%
Limpeza das placas de aquecimento	20,00	0,06%	99,94%
Desligamento do equipamento devido utilidades	20,00	0,06%	100,00%
Total	31325,00	100,00%	

Juntamente, foram calculadas as porcentagens simples e acumulada que cada tipo de parada apresentava em relação ao tempo total de paradas, de forma a ser possível a realização de um demonstrativo obtido pela técnica do Diagrama de Pareto, apresentado na Figura 5. Dessa forma, estão destacadas as causas responsáveis por 80% do tempo total de paradas.

Figura 5 – Diagrama de Pareto dos tempos de parada da linha de embalagem em estudo



Fonte: Elaborado pelos autores

Desconsiderando-se os dias de férias coletivas de começo de ano, chegou-se aos valores diários apontados na Tabela 5, em formato de distribuição estatística.

Tabela 5 – Tempos de parada diárias nos meses de Janeiro e Fevereiro de 2012

Paradas – diárias		
Tipo de parada	Tempo de parada (s)	Location
Ajuste em processo operacional	N(6502,17; 113,585)	Máquina 20
Má qualidade do material de embalagem	N(6358,70; 141,117)	Máquina 27
Parada por falha de processo: matéria-prima (granel)	N(6176,09; 178,324)	Máquina 4
Ajuste manutenção equipamentos	N(4506,52; 159,559)	Máquina 12
Refeição	N(3834,78; 93,078)	Geral
Outros	N(3443,48; 71,635)	Geral
Troca de lote	N(2282,61; 39,562)	Geral
Pequenas operações em vazio	N(1617,39; 33,583)	Geral
Quebras do equipamento – manutenção	N(1591,30; 98,109)	Geral
Retrabalho/ desacúmulo de blisteres	N(1036,96; 31,704)	Máquina 24
Limpeza e sanitização	N(860,87; 81,347)	Geral
Desvio na folha de pvc	N(769,57; 29,669)	Máquina 8
Acúmulo na ferramenta de corte	N(665,22; 26,255)	Máquina 12
Aguardando documentação/ liberação da linha	N(254,35; 14,220)	Geral
Desligamento do equipamento	N(228,26; 19,307)	Geral
Aguardando manutenção	N(215,22; 18,116)	Geral
Reuniões e paradas exclusivas	N(182,61; 21,803)	Geral
Falta de material/ granel	N(156,52; 13,312)	Máquina 1
Descentralização do alumínio	N(123,91; 10,876)	Máquina 8
Limpeza das placas de aquecimento	N(26,087; 3,846)	Máquina 3
Desligamento do equipamento devido utilidades	N(26,087; 54,859)	Geral

As paradas que puderam ser atribuídas a uma atividade em específico receberam a designação do local em que ocorreram. Em caso contrário, foram classificadas como geral, ou

por pararem a máquina por inteira ou por terem ocorrência em diversas atividades.

4.5 Construção, verificação e validação do modelo computacional

O modelo computacional foi construído, como apresentado anteriormente, no simulador *Promodel*®.

Inicialmente, foi construído um modelo com as principais *locations*, *entities* e com a definição dos processos. Em seguida, as lógicas dos processos foram programadas e as distribuições de tempos foram acrescentadas.

Foram utilizados contadores nas *locations* e variáveis globais no sistema para verificar se as capacidades atendem ao modelo. Foram programadas também macros, de forma a se tornar possível a alteração de valores, para análise da consequência da alteração de parâmetros no sistema. Diversos modelos foram construídos para que se chegasse ao ponto de se ter uma versão que pudesse ser validada. Para a validação, foram utilizadas duas técnicas.

A primeira técnica foi a validação face a face, na qual o gerente da área observou o desempenho da simulação e, ao ser perguntado quanto à coerência em comparação com a realidade, validou o modelo computacional. A segunda técnica foi a validação estatística. Nesta validação, os resultados da simulação foram comparados com dados históricos da empresa. Para isto, o modelo foi executado para um dia, com 20 replicações, que é quantidade de dias dos meses de Janeiro e Fevereiro de 2012 em que houve produção na linha de embalagem e que tenham sido considerados dias regulares, sem descontos de horas ou de turnos na produção. Na empresa em questão, a produção total diária é representada pela quantidade de cartuchos produzidos.

A Tabela 6 indica o total da produção realizada nos dias simulados pelo modelo computacional e os dados reais.

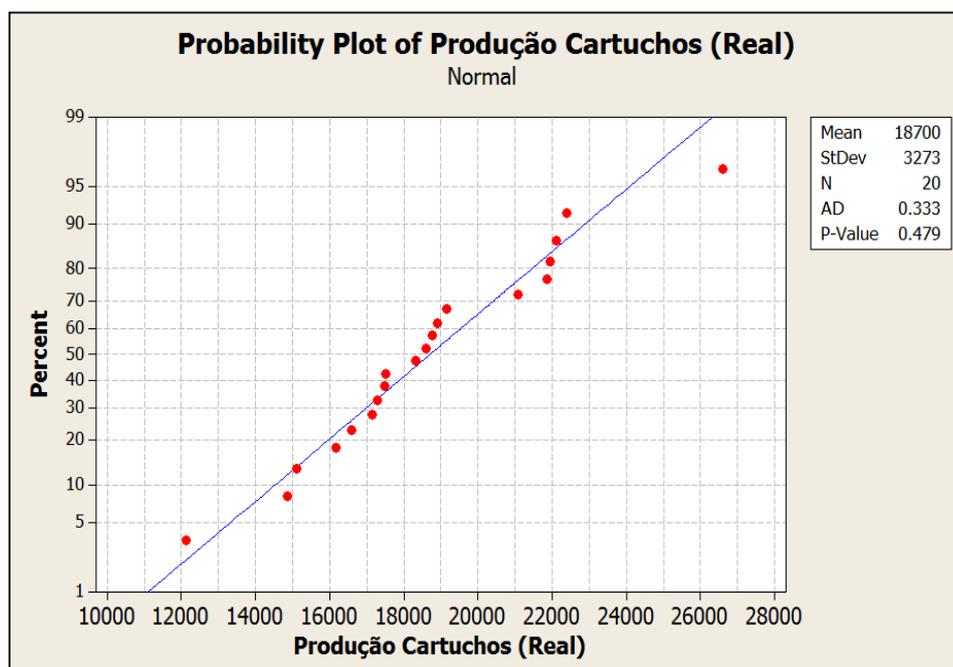
Tabela 6 – Produção de cartuchos indicada pela simulação e produção de cartuchos real

Dia	Produção de Cartucho (Simulação)	Produção de Cartuchos (Real)
1	18972	18760
2	18876	21864
3	18720	18912
4	18960	17520
5	18924	17136
6	18972	19152
7	19080	17491
8	18816	21955
9	18948	26604
10	18852	22100
11	18720	16171
12	18852	18304
13	18900	12116

Dia	Produção de Cartucho (Simulação)	Produção de Cartuchos (Real)
14	19020	14868
15	18984	17275
16	19116	15107
17	18960	18600
18	18876	16584
19	18888	22401
20	18972	21079

Um teste de normalidade foi realizado em cada amostra, por meio do software Minitab®. Os resultados dos testes podem ser visualizados nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Teste de normalidade aplicado à amostra da produção de cartuchos real

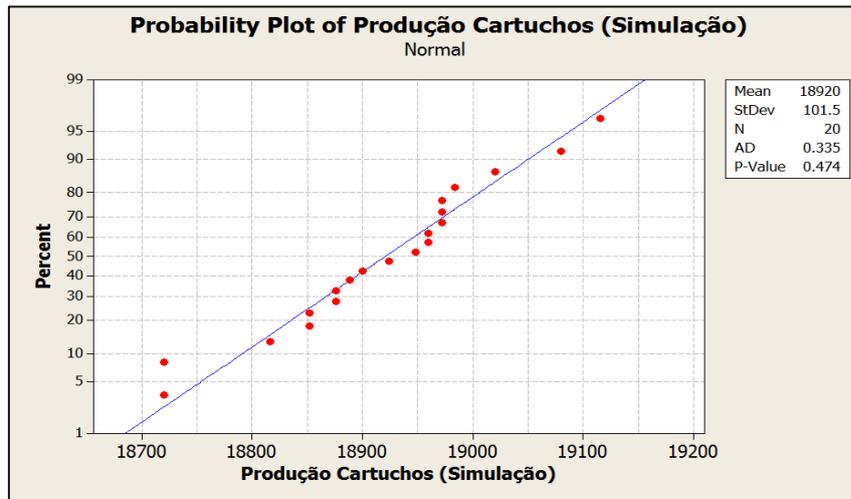


Fonte: Elaborado pelos autores

Como pode ser visualizada na Figura 6, a produção da linha pode ser aproximada por meio de uma distribuição normal, uma vez que o p-value do teste (0,479) foi superior ao nível de significância adotado de 0,05.

O mesmo pode ser concluído sobre os dados simulados no modelo computacional, apresentados na Figura 7. Como o p-value do teste (0,474) foi superior ao nível de significância de 0,05, os dados simulados também podem ser aproximados por meio de uma distribuição normal.

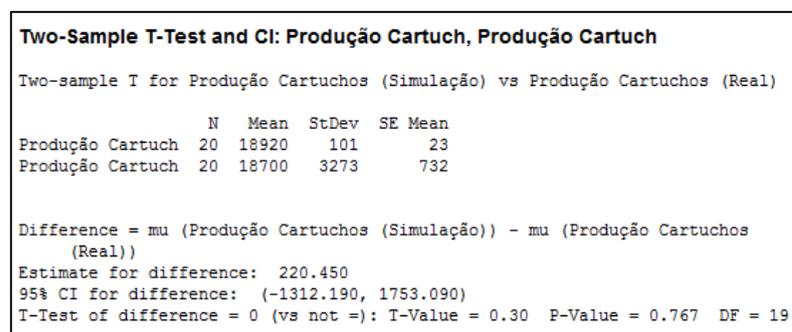
Figura 7 – Teste de normalidade aplicado à amostra da produção de cartuchos simulada



Fonte: Elaborado pelos autores

Posteriormente, foi realizado o teste T, que testa a igualdade de médias entre as amostras. Como visto na Figura 8, o resultado indicou p-value igual a 0,767, ou seja, acima do nível de significância adotado (0,05).

Figura 8 – Resultado do teste T de igualdade de médias entre as amostras simulada e real



Fonte: Elaborado pelos autores

Portanto, o modelo de simulação está validado pela técnica face a face e também está estatisticamente validado.

4.6 Execução dos experimentos e Análise dos resultados

De posse de um modelo de simulação verificado e validado para representar a linha de embalagem estudada, pode-se utilizar este modelo para se analisar o impacto dos tempos de paradas de máquina no índice de produtividade e, assim, criar uma importante ferramenta gerencial, possibilitando a escolha de ações preventivas e corretivas mais adequadas ao sistema.

Foram criados 6 cenários para a simulação. O primeiro deles é o cenário real, que apresenta as condições existentes atualmente na linha produtiva. Os cinco cenários seguintes são cenários com melhorias, que representam a situação atual, porém com modificações nas macros referentes aos tempos de paradas da máquina. Nestes últimos cenários, foram realizadas reduções graduais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% nos tempos de parada mais relevantes e que representam 80% do tempo de paradas total da máquina. Pode-se observar pelo Diagrama de Pareto apresentado na Figura 5, que tais paradas consistem em: “ajuste em processo operacional”, “má qualidade do material de embalagem”, “falha de processo: matéria prima (granel)”, “ajuste manutenção equipamentos”, “refeição”, “outros” e “troca de lote”.

A presença do item “outros” dentre os tempos de parada mais relevantes leva à compreensão de que tal item ainda necessita de um desdobramento em causas com identificações mais específicas, de forma a permitir melhor visualização dos motivos que causam tanta influência na produtividade da linha. Como tal item ainda não permite um direcionamento das ações preventivas e corretivas, por não indicar uma causa específica, reduziu-se o tempo imediatamente seguinte, representado por “pequenas operações em vazio”. Os resultados da produção total obtidos pelas 6 simulações com cenários diferentes estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Total de cartuchos produzidos em cada cenário de simulação

Cenário	Produção de cartuchos
Real	18972
1 (redução de 10%)	19356
2 (redução de 20%)	19740
3 (redução de 30%)	20172
4 (redução de 40%)	21012
5 (redução de 50%)	21480

O índice de produtividade utilizado pela empresa segue a seguinte definição (Equação 2):

$$\text{Índice de produtividade} = \frac{\text{Quantidade Entregue}}{\frac{\text{Vazão Teórica}}{\text{Opening Time}}} \quad (2)$$

Sendo:

- Quantidade Entregue = quantidade de unidades comerciais (cartuchos) produzidos por dia (contados a partir do começo do primeiro turno até o final do terceiro turno);

- Vazão Teórica = quantidade de unidades comerciais (cartuchos) produzidos quando a máquina está na velocidade máxima recomendada pelo fabricante, no período de um dia.
- *Opening Time* = tempo total disponível para operação da máquina, no período de um dia.

Tem-se que a Vazão Teórica e o *Opening Time* permanecem constantes com as alterações feitas no tempo de paradas. Para estabelecer o impacto da alteração do tempo de paradas no valor do índice de produtividade, basta verificar qual a porcentagem da consequente alteração da Quantidade Entregue e atribuir este valor à porcentagem de alteração do índice, tendo em vista que são valores diretamente proporcionais. Chega-se, portanto, aos seguintes resultados de influência no índice de produtividade (Tabela 8).

Tabela 8 – Ganho no OEE da linha de acordo com o cenário simulado

Cenário	Ganho na produtividade da linha
1 (redução de 10%)	2,02%
2 (redução de 20%)	4,05%
3 (redução de 30%)	6,33%
4 (redução de 40%)	10,75%
5 (redução de 50%)	13,22%

Verifica-se que mesmo uma redução de tempo considerada baixa pelos profissionais que conhecem o sistema real, aplicada em apenas um terço das causas de paradas da máquina, representa um ganho importante. Dessa forma, as ações preventivas e corretivas, se direcionadas à redução de tais tempos indicados, conduzirão a um ganho considerável na produtividade.

A partir deste modelo computacional, podem ser extraídos diversos outros tipos de análise. Podem ser realizadas, por exemplo, ponderações econômicas acerca da viabilidade de se melhorar a qualidade do material de embalagem. Se utilizado um lote teste do novo material, consegue-se verificar, no sistema real, a porcentagem da variação nos tempos de paradas. Lançando-se este valor no simulador, obtém-se a porcentagem de variação da quantidade produzida ao final do dia. Com tais valores, se torna possível a montagem de um fluxo de caixa que indique se haverá compensação do investimento no novo material e em quanto tempo isto se dará. Outro exemplo de aplicação de experimentos no modelo computacional desenvolvido é a avaliação da viabilidade de alterações no maquinário. De maneira análoga, lança-se no modelo computacional o ganho em capacidade provido pelo novo item da máquina, de forma a se obter a porcentagem de variação da quantidade

produzida ao final do dia. Um fluxo de caixa semelhante indica se o investimento na alteração será compensado futuramente e quando isto se dará.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma importante ferramenta de auxílio à decisão para a empresa farmacêutica em estudo. O desenvolvimento de um modelo conceitual, a coleta e posterior análise estatística dos dados referentes à linha de embalagem, o desenvolvimento do modelo computacional e a análise de experimentos na modelagem elaborada permitiram um direcionamento das tomadas de decisões, de forma que foi possível se mensurar os ganhos obtidos com a redução nos tempos de paradas que foram definidos como os mais relevantes. Verificou-se, então, o grande impacto que as paradas de máquina impõem no índice de produtividade.

Como recomendação, indica-se a necessidade de desmembramento do item “outros” dentre as causas de paradas da máquina, tendo em vista sua grande participação no tempo total de paradas. Isto permitirá um correto direcionamento de ações em um ponto que sabidamente trará ganhos produtivos.

Notou-se também que, em um período de tempo de 2 meses, foram desconsiderados muitos dias para se realizar a comparação estatística entre a amostra simulada e a amostra real. Isto se deve ao fato de que esses dias desconsiderados não foram dias regulares, com descontos de horas ou de turnos na produção. Percebe-se, então, a necessidade de sincronia entre as áreas produtivas e de manutenção. Tal sincronia significa o planejamento e a programação de concessões de intervalos pela área de produção para que a área de manutenção possa executar serviços preventivos e preditivos, buscando em conjunto, o melhor resultado de produção.

Conclui-se, portanto, que a utilização de um modelo de simulação com tamanha flexibilidade torna praticável a execução de diversos experimentos que representem tanto a realidade quanto cenários que apresentem modificações pretendidas no sistema real. Desta forma, se faz possível a análise destas idealizações, sem a necessidade de comprometimento ou paralisação da linha e com uma previsão coerente da viabilidade de tais alterações sistêmicas.

Como trabalhos futuros recomenda-se a utilização deste modelo de simulação para diversas outras análises, como, por exemplo, avaliações econômicas acerca da viabilidade de

se melhorar a qualidade do material de embalagem ou a avaliação da viabilidade de alterações de maquinário.

IMPACT ANALYSIS OF MACHINE STOPS IN A PHARMACEUTICAL COMPANY THROUGH SIMULATION

ABSTRACT: The interest in the use of process simulation approach has been growing lately, due to its economic advantages and close resemblance to the real scenarios. Thus, this paper aims for the development of a simulation model, which shows the behavior of a packaging line in a pharmaceutical company. In order to analyze the impact of machine's interruption periods on the productivity index. For this, the modeling and simulation research method was used. The conceptual model development, the collect and analysis of data referring to the packaging line. The computational model development and the experiments analysis using the model created turned into an important management tool. Which can be used for benefit of those responsible for decision-making, aiming for the choice of preventive and corrective actions more suitable for the system. Moreover, the possible solutions tested by simulation do not imply costs of implementation and there is no necessity of line impairment or interruption.

Keywords: Discrete events simulation. Modeling and simulation. Pharmaceutical company.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, ao CNPq e a CAPES por todo suporte ao longo dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULMALEK, F.A.; RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. **International Journal of Production Economics**, n. 107, p. 223-236, 2007.

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete event system simulation**. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2005.

BESSERIS, G. J. Profiling effects in industrial data mining by non-parametric DOE methods: An application on screening check weighing systems in packaging operations. **European Journal of Operational Research**, v.1, p.147-161, 2012.

CHUNG, C.A. **Simulation Modeling Handbook**: a practical approach. Washington D.C: CRC press, 2004.

CHWIF, L.; PAUL, R.J.; BARRETTO, M.R.P. Discrete event simulation model reduction: A causal approach. **Simulation Modelling Practice and Theory**, n. 14, p. 930-944, 2006.

DENGIZ, B.; BELGIN, O. Simulation optimization of a multi-stage multi-product paint shop line with Response Surface Methodology. **Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International**, v.90, n.3, p.1-10, 2014.

ESKANDARI, H., BABOLMORAD, N., FARROKHANIA, N. Bottleneck analysis in a pharmaceutical production line using simulation approach. In: Summer Computer Simulation Conference, **Proceedings...** Toronto, 2013.

GARZA-REYES, J.A.; ELDRIDGE, S.; BARBER, K.D.; SORIANO-MEIER, H. Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures: a relationship analysis. **International Journal of Quality Reliability Management**, v. 27, n.1, p. 48-62, 2010.

GREASLEY, A. Using business-process simulation within a business-process reengineering approach. **Business Process Management Journal**, v. 9, n. 4, p.408-420, 2003.

GREASLEY, A. Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organization. **Technovation**, n. 26, p.95-103, 2006.

HARREL, C.; GHOSH, B.K.; BOWDEN, R.O. **Simulation Using Promodel**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

HOQUE, M.E.; PAUL, N. Inventory Management of Pharmaceutical Industries in Bangladesh. **System**, v. 2, p. 3, 2011.

KELTON, D.W.; SADOWSKI, R.P.; STURROCK, D.T. **Simulation with Arena**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

KREMER, D.M.; HANCOCK, B.C. Process simulation in the pharmaceutical industry: a review of some basic physical models. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 95, n. 3, p. 517-529, 2006.

LAW, A.M.; KELTON, D.W. **Simulation modeling and analysis**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.; MONTEVECHI, J.A.B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, **Anais...** João Pessoa, PB, 2008.

MARTINS, R.A. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: Miguel, Paulo A. C. (Org). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier. Cap. 3, p.45-61, 2010.

MESQUITA, M.A.; SANTORO, M.C. Análise de modelos e práticas de planejamento e controle da produção na indústria farmacêutica. **Revista Produção**, v. 14, n. 1, p. 65, 2004.

MONTEVECHI, J.A.B.; LEAL, F.; PINHO, A.F.; COSTA, R.F.S.; OLIVEIRA, M.L.M.; SILVA, A.L.F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an

application in a Brazilian tech company. In: **Proceedings...**, of the Winter Simulation Conference, Baltimore, USA, 2010.

MORABITO, R.A.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, PAULO A. C. (Org). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier. cap 8, p.165-194, 2010.

O'KANE, J.F.; SPENCELEY, J.R.; TAYLOR, R. Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. **Journal of Materials Processing Technology**, n.107, p.412-424, 2000.

PAPAVASILEIOU, V.; KOULOURIS, A.; SILETTI, C.; PETRIDES, D. Optimize Manufacturing of Pharmaceutical Products with Process Simulation and Production Scheduling Tools. **Chemical Engineering Research and Design**, v.85, n.7, p.1086-1097, 2007.

PETRIDES, D.; CARMICHAEL, D.; SILETTI, C.; KOULOURIS, A. Biopharmaceutical Process Optimization with Simulation and Scheduling Tools. **Bioengineering**, v.1, n.4, p.154-187, 2014.

SANCHEZ, S.M. Work smarter, not harder: guidelines for designing simulation experiments. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Washington, DC, USA, 2007.

SANVITO, W.L. Indústria farmacêutica: uma abordagem crítica. **Revista da Sociedade Brasileira de Clínicas Médicas**, v. 10, n. 4, p. 346-50, 2012.

SARGENT, R.G. Verification and validation of simulation models. In: Winter Simulation Conference, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2009.

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

STROHHECKER, J.; SIBBEL, R.; DICK, M. Integrating Kanban principles in a pharmaceutical campaign production system. **Production Planning & Control**, v.25, n.15, p.1247-1263, 2014.

TOUMI, A. et al. Design and optimization of a large scale biopharmaceutical facility using process simulation and scheduling tools. **Pharmaceutical Engineering**, v.30, n.2, p.1-9, 2010.

Originais recebidos em: 03/07/2013

Aceito para publicação em: 02/01/2015