

# O USO DO PROJETO DE EXPERIMENTOS SIMULADOS PARA ANÁLISE DO EFEITO INTERATIVO DE FALHAS EM PROCESSOS: UM CASO HIPOTÉTICO

Fabiano Leal <sup>1,2</sup>, fleal@unifei.edu.br

Dagoberto Alves de Almeida <sup>1</sup>, dagoberto@unifei.edu.br

José Arnaldo Barra Montevechi <sup>1</sup>, montevechi@unifei.edu.br

Fernando Augusto Silva Marins <sup>2</sup>, fmarins@feg.unesp.br

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, SP, Brasil

\*Recebido: Outubro, 2007 / Aceito: Dezembro, 2007

## RESUMO

*Este trabalho apresenta uma análise do efeito interativo de falhas em um processo, através do uso de experimentos simulados. O processo escolhido é um sistema hipotético, simulado através do software Promodel®. Dois modelos conceituais são gerados, representando o sistema (mapeamento do processo) e as falhas consideradas neste sistema (Fault Tree Analysis). Estes modelos conceituais são convertidos em um modelo computacional, para a avaliação dos efeitos individuais e combinados entre as falhas, sobre a variável "número de peças produzidas". Esta experimentação é projetada através do DOE (Design of Experiments), verificando assim se os efeitos principais e combinados entre as falhas do processo, para um determinado nível de significância, devem ser aceitos ou rejeitados.*

**Palavras-chave:** Interação de falhas. Simulação de eventos discretos. Projeto de experimentos.

## 1. INTRODUÇÃO

Em sistemas de produção, é comum encontrar-se políticas específicas para o controle de falhas. Estas falhas podem surgir no produto final, afetando seu desempenho e podendo levar o cliente final a um estado de frustração. Além disto, as falhas podem ocorrer no processo, causando o desperdício de materiais, diminuindo a taxa de produção, aumentando o *lead time*, entre outros efeitos.

Em alguns sistemas, falhas em certos componentes podem interagir entre si, e acelerar a taxa de falhas destes componentes. Estas falhas são definidas como falhas interativas, e ocorrem principalmente em sistemas mecânicos. Se este efeito interativo for ignorado, o risco da falha será subestimado. Entretanto, como afirmam os autores Sun *et al.* (2006, p.495, grifo do autor), em se tratando do assunto interação de falhas, "(...) a literatura é **silenciosa** em pesquisas que explorem este campo". Esta importante afirmação de Sun *et al.* (2006) vem reforçar a proposta deste presente trabalho.

Para se avaliar o efeito de uma falha sobre uma variável de saída de um determinado processo, torna-se necessário gerar um modelo, que represente de forma aceitável o processo real. Porém, a complexidade dos processos de manufatura impõe ao modelador a necessidade de se incluir várias variáveis, como tempo de operação das máquinas, paradas programadas, *setups*, estoques intermediários, tempos de deslocamentos, porcentagem de refugo e/ou retrabalho, tempos de esperas, entre outras. O agravante é que estas variáveis assumem, na maioria dos casos, um comportamento estocástico. Este tipo de problema é indicado ao uso da simulação computacional.

A simulação, com o avanço computacional e as opções de softwares no mercado, obteve um forte impulso para sua utilização (Law e Kelton, 1991). Mediante um trabalho de verificação e validação de modelos, a simulação proporciona a realização de experimentos, respondendo a pergunta "o que aconteceria se".

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da interação de falhas em um processo de manufatura, através de experimentos simulados. Estes experimentos serão planejados através do DOE, e simulados no software Promodel®. O modelo conceitual será obtido através do mapeamento do processo e do mapeamento das falhas, através da técnica FTA – Árvores de falhas (*Fault Tree Analysis*), discutida em trabalhos como Stamatis (2003), Shalev e Tiran (2007). O caso analisado corresponde a um sistema hipotético, desenvolvido através de informações coletadas em bancos de trabalhos na universidade. Segundo Chwif e Medina (2006, p.5)

"(...) pode-se também simular um sistema hipotético (...). Embora o processo de validação seja mais difícil para um sistema não existente, é viável e comum, na prática, a construção de modelos de simulação de sistemas hipotéticos ou imaginários".

## 2. ANÁLISE DE FALHAS

De acordo com Rausand e Oien (1996), a falha representa um conceito fundamental para a análise de confiabilidade, sendo a falha definida como o término da habilidade de um item para o desempenho de uma requerida função. A qualidade de uma análise de confiabilidade depende fortemente da habilidade do analista em identificar todas as funções desempenhadas pelos componentes e as possíveis falhas com potencial de ocorrência.

Técnicas como a FMEA – Análise dos efeitos e modos de falha (*Failure Mode and Effects Analysis*) e a FTA são encontradas na literatura em estudos relacionados à análise de falhas e estudos de confiabilidade (Stamatis, 2003; Shalev e Tiran, 2007) .

Segundo Puente *et al.* (2002), a FMEA basicamente consiste em dois estágios. Durante o primeiro estágio, possíveis modos de falhas de um produto ou processo e seus efeitos prejudiciais são identificados. Durante o segundo estágio, os times de engenheiros que trabalharam com a FMEA determinam o nível crítico (pontuação de risco) destas falhas e as colocam em ordem. A falha mais crítica será a primeira do ordenamento e será considerada prioritária para a aplicação de ações de melhoria.

Price e Taylor (2002), analisando o uso da FMEA no estudo de falhas em componentes eletrônicos, alertam que na maior parte das vezes, somente os efeitos isolados das falhas são considerados, justificando que a consideração de todas as possíveis combinações de falhas é impraticável. Não se pretende neste trabalho utilizar a técnica da FMEA para hierarquização de falhas. Porém, o alerta de Price e Taylor (2002) reforça a importância da análise de múltiplas falhas em processos.

A identificação das relações de causa efeito pode ser obtida através da FTA. Scapin (1999) afirma que a utilização da FTA visa à identificação de pontos para a introdução de melhorias ou de modificações para tornar o produto mais robusto, através de abordagem sistêmica, traçando a rota entre os sintomas percebidos pelos clientes e as causas das anomalias dentro da arquitetura do produto.

Roque-Specht (2002) define a FTA como sendo um método sistemático para determinar e exibir a causa de um evento indesejável. O método inicia com o “topo” do evento e desenvolve uma árvore lógica, mostrando as causas dos eventos através do uso de operadores lógicos “e” e “ou”. Estes operadores lógicos são utilizados quando também se deseja fazer uma análise quantitativa das árvores de falhas, ou seja, verificar qual a probabilidade de determinado evento ocorrer.

De acordo com Shalev e Tiran (2007), a lógica aplicada na construção dos modelos é de cima para baixo (*top-down*). O analista repetidamente pergunta: “o que causará uma possível falha?”. Na base de cada possível caminho representado na árvore (pés da árvore) existe um evento básico de falha. O analista então atribui a cada um destes eventos básicos uma taxa de falha. Frequentemente, a taxa de falhas atribuída é um dado estatístico proveniente de variadas fontes. A Figura 1 apresenta um exemplo simplificado de aplicação da FTA.

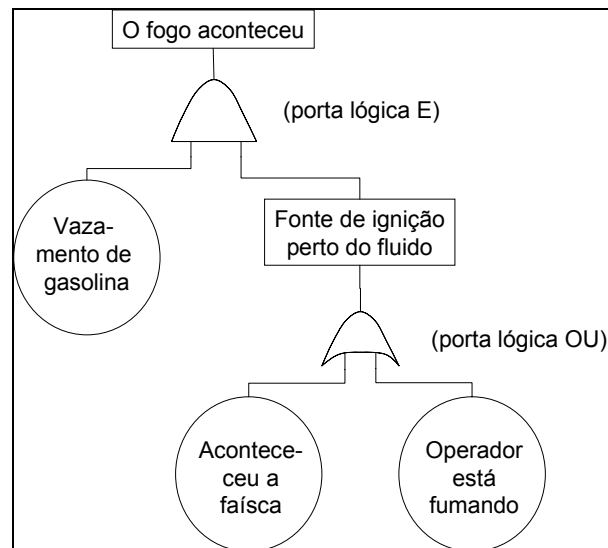


Figura 1 – Exemplo de aplicação da FTA, destacando os portais lógicos  
Fonte: Scapin, 1999.

Porém, na engenharia de confiabilidade tradicional, é usual assumir que as falhas de componentes são eventos independentes. Esta suposição assegura situações onde as falhas em componentes não induzem efeitos em outros componentes.

Sun *et al.* (2006) afirmam que a maioria dos modelos apresentados na literatura para análise de falhas apresenta a suposição de que as falhas são independentes. Entretanto, experiências industriais têm mostrado que esta suposição de falhas independentes têm sido irrealis.

A falha de um componente, sem estar sendo afetado pelas falhas de outros componentes, é chamada de falha independente. Da mesma forma, a probabilidade de falha deste componente, neste caso, é chamada de probabilidade de falha independente. A probabilidade de falha de um componente será diferente de sua probabilidade de falha independente se ele for afetado por falhas de outros componentes (SUN *et al.*, 2006).

Os autores Sun *et al.* (2006) afirmam que, em alguns sistemas, falhas em certos componentes podem interagir entre si, e acelerar a taxa de falhas destes componentes.

Estas falhas são definidas como falhas interativas, e ocorrem principalmente em sistemas mecânicos. Se este efeito interativo for ignorado, o risco da falha será subestimado.

### 3. SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Segundo Chwif e Medina (2006), os sistemas reais, geralmente, apresentam uma maior complexidade devido, principalmente, a sua natureza dinâmica (que muda seu estado ao longo do tempo) e a sua natureza aleatória (que é regida por variáveis aleatórias). O modelo de simulação consegue capturar com mais fidelidade essas características, procurando repetir em um computador o mesmo comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às mesmas condições de contorno.

Ainda dentro deste contexto, para Ryan e Heavey (2006), muitos sistemas podem ser encarados como sistema de eventos discretos, como sistemas de manufatura, processos de negócios, cadeias de suprimentos. Estes sistemas são complexos, no que tange ao seu entendimento e a sua operacionalização de forma eficiente. Devido a sua grande versatilidade, flexibilidade e poder de análise, a simulação é uma das mais utilizadas técnicas de pesquisa utilizada.

De acordo com Harrel e Tumay (1994), o bom modelo deve possuir certas características, como ser válido no sentido de representar satisfatoriamente a realidade; e ser mínimo, no sentido de incluir somente elementos que influenciam no problema a ser solucionado. Neste contexto, Chwif (1999) apresenta três fases distintas no processo de simulação. Estas fases estão representadas na Figura 2.

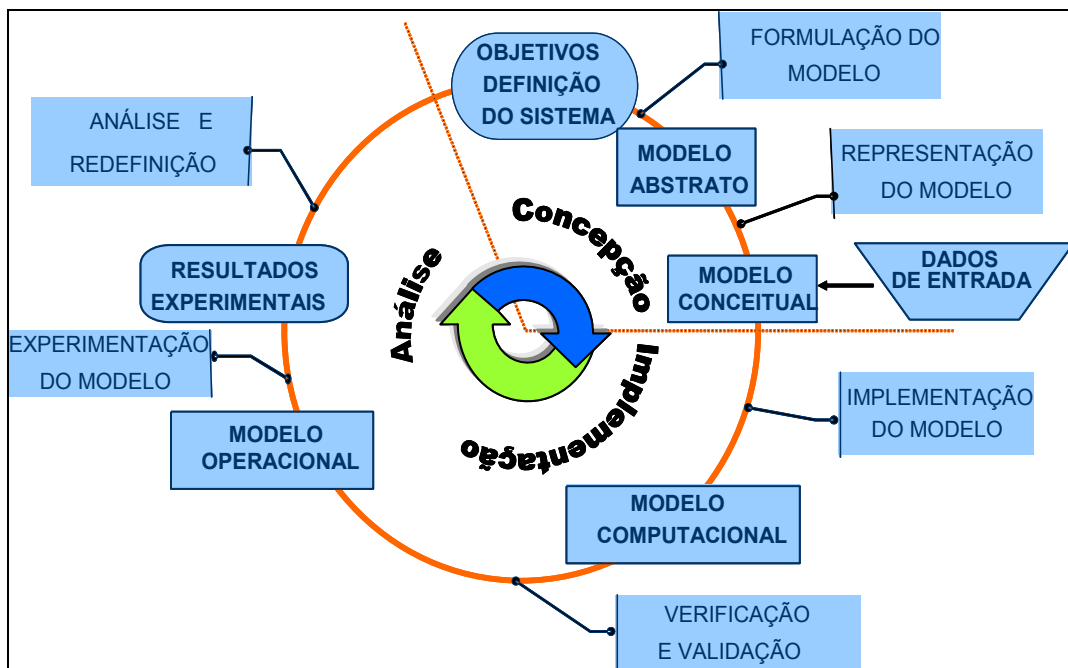


Figura 2 – Fases da simulação propostas por Chwif (1999)

Sheppard (1983) já havia defendido em seu trabalho a regra do “40-20-40”. Esta regra define que, no desenvolvimento de um modelo, o tempo total despendido pelo analista deveria ser dividido da seguinte forma:

- 40% gasto na definição do problema, planejamento do projeto, definição do sistema, formulação do modelo conceitual, projeto experimental preliminar e preparação dos dados de entrada;
- 20% na conversão do modelo (*model translation*);

- 40% na experimentação (com um modelo validado e verificado), projeto experimental final, análise da experimentação, interpretação, implementação e documentação.

Segundo Law (1991), a etapa de criação do modelo conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação. Autores como Chwif e Medina (2006, p.55) alertam em seu trabalho que "(...) a etapa de criação do modelo conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação (...) embora muitos livros e muitos analistas pulem esta etapa".

Trabalhos como de Greasley (2006) e Leal *et al.* (2006) utilizam o mapeamento de processo como forma de descrever a lógica e determinar os pontos de decisão, antes mesmo do modelo computacional.

Para diminuir a probabilidade de se utilizar um modelo conceitual errado, torna-se necessário a validação deste modelo conceitual. Antes de tudo, o modelo conceitual deve ser construído de acordo com os objetivos da simulação.

A literatura apresenta algumas técnicas para validação de modelos conceituais. Dentre elas, pode-se citar:

- duplicação de modelos: equipes diferentes confeccionam um modelo conceitual. Se as equipes (operando de forma independente), desenvolverem modelos similares, este seria um bom indicador da validade do modelo (Harrel *et al.* 1996; Chwif e Medina, 2006);
- comparação com modelos anteriores: desenvolvimento de um modelo a partir de outro já validado (Harrel *et al.* 1996; Chwif e Medina, 2006);
- validação face-a-face: discussão com especialistas, aplicado tanto no modelo conceitual como no operacional (Sargent, 1992; Harrel *et al.* 1996; Chwif e Medina, 2006);

A confecção do modelo computacional pressupõe a escolha de algum software de simulação. Hlupic e Paul (1996) apresentam uma abordagem metodológica para seleção do software de simulação, de acordo com alguns critérios, como custo e tempo de processamento.

O modelo computacional deve ser analisado através da verificação e validação. A verificação do modelo consiste na constatação de que o modelo está sendo construído de forma correta. Segundo Law e Kelton (1991), a verificação avalia se a simulação computacional se executa conforme o planejado, através de, por exemplo, ações de depuração.

A literatura apresenta algumas técnicas para verificação de modelos. Dentre elas, pode-se citar:

- implementação modular/verificação modular: verificação do modelo em partes (Chwif e Medina, 2006; Banks, 1998);
- valores constantes ou simplificados *versus* cálculos nominais: toma-se os valores médios de cada distribuição e considera-se estes valores como determinísticos (Chwif e Medina, 2006);
- utilização do *debugger* ou depurador (Chwif e Medina, 2006);
- animação gráfica: considerada uma poderosa ferramenta de verificação por meio da observação do fluxo simulado através de recursos visuais (Chwif e Medina, 2006; Kleijnen, 1995; Banks, 1998);

- *tracing*: processo de captura dos resultados intermediários do modelo computacional, de forma automática (Kleijnen, 1995);
- observação do código da programação (Banks, 1998).

Conforme mostrado anteriormente, além da verificação torna-se necessário a validação. Esta última comprova que o modelo, dentro do seu domínio de aplicabilidade, se comporta com precisão satisfatória dentro dos objetivos da simulação. A validação do modelo corresponde à construção do modelo certo. Estudos específicos sobre verificação e validação de modelos podem ser encontrados em Yilmaz e Balci (1997), Kleijnen (1995), Banks (2001) e Sargent (1992).

No caso do modelo computacional, a validação é retratada como validação operacional. Devido às dificuldades desta validação, pode-se dizer que esta etapa corresponde a uma fase crítica da metodologia.

A Figura 3 representa o triângulo Mundo Real – Modelo Conceitual – Modelo Computacional, e o posicionamento das validações de acordo com o modelo (conceitual ou computacional).

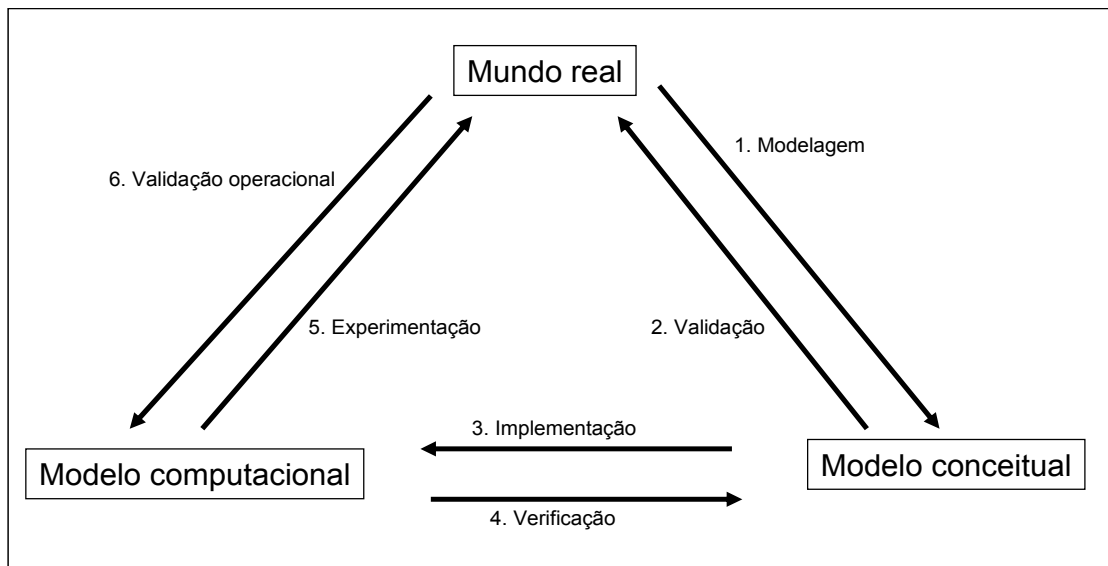


Figura 3 – Validação e verificação dentro da metodologia de simulação  
Adaptado de Chwif e Medina, 2006

Da mesma forma, a literatura apresenta algumas técnicas para a validação operacional. Dentre elas, pode-se citar:

- teste de *Turing* ou validação *black-box*: escolhe-se uma pessoa que entenda bem do sistema (especialista) que foi simulado e apresenta-se a ela dois conjuntos de dados de saída, um vindo do sistema real e outro do modelo de simulação. Caso o especialista não consiga distinguir se os resultados são oriundos do sistema real ou do modelo de simulação, então, o modelo poderia, em certa extensão, ser considerado “válido” (Chwif e Medina, 2006). Por apresentar uma forte subjetividade, esta técnica de validação não deve ser utilizada de forma isolada;
- análise de sensibilidade: com as mudanças nos dados de entrada, os dados de saída devem se alterar em uma direção prevista (Sargent, 1992). O mesmo autor também defende o teste de condição extrema, no qual valores extremos são inseridos nas variáveis de entrada. Autores como Kleijnen (1995) criticam este método, sobretudo pela subjetividade.

- testes estatísticos: análises estatísticas que confirmam ou não a hipótese de que o modelo de simulação está apto a representar o sistema real, dentro das condições pré-estabelecidas. A comparação dos resultados gerados pelo sistema real e pelo modelo computacional é realizada através de testes estatísticos. Anteriormente a esta fase, identifica-se o tipo de distribuição dos dados, para a escolha correta dos testes. No caso de distribuições contínuas, alguns testes são apresentados por Chung (2004). O tratamento dado a distribuições discretas é apresentado por Bisgaard e Fuller (1994).

O uso do DOE para experimentos simulados é apresentado em trabalhos como de Kleijnen (1995). Depois da seleção da combinação dos fatores, o programa de simulação é executado (ou rodado) para estas combinações. Após, o DOE permite analisar os resultados dos dados de entrada-saída do experimento, para se gerar conclusões sobre a importância dos fatores.

Os benefícios do projeto de experimentos na simulação incluem a possibilidade da melhoria do desempenho no processo de simulação, evitando a técnica da tentativa-e-erro para a busca de soluções. Kleijnen *et al.* (2005) afirmam que pesquisas relacionadas a projeto de experimentos são frequentemente encontradas em revistas especializadas, mas raramente lidas por praticantes de simulação.

#### **4. METODOLOGIA**

O procedimento experimental simulado é indicado quando a execução dos experimentos é considerada inviável, ou mesmo impossível de ser realizada. No caso desta pesquisa, os experimentos a serem executados envolvem a introdução de falhas em máquinas, matéria prima e procedimentos manuais, acarretando custos às empresas interessadas em tal abordagem. Não se pretende nesta pesquisa afirmar a impossibilidade do uso de outras técnicas além da simulação. Pretende-se mostrar as vantagens do uso da simulação para problemas deste tipo, devidamente planejada através do projeto de experimentos.

Os passos a serem seguidos nesta pesquisa estão representados na Figura 04. Através da análise da metodologia de simulação proposta por Chwif (1999) e dos passos propostos por Montgomery (2001), para o projeto de experimentos, construiu-se um fluxograma que procura explicar a lógica do processo de simulação, cuja fase de experimentação é conduzida pelo DOE.

#### **5. APLICAÇÃO**

Este item foi organizado de acordo com os passos estipulados na Figura 4.

##### **5.1 CONCEPÇÃO**

###### Objetivos e definição do sistema

Para se atingir os objetivos propostos, definiu-se um sistema hipotético, construído a partir de dados de outras pesquisas já realizadas pelo grupo de pesquisa a qual se inserem os autores.

O sistema hipotético é composto por quatro postos de trabalho, organizados em um arranjo físico linear. O fluxo será considerado contínuo, peça a peça.

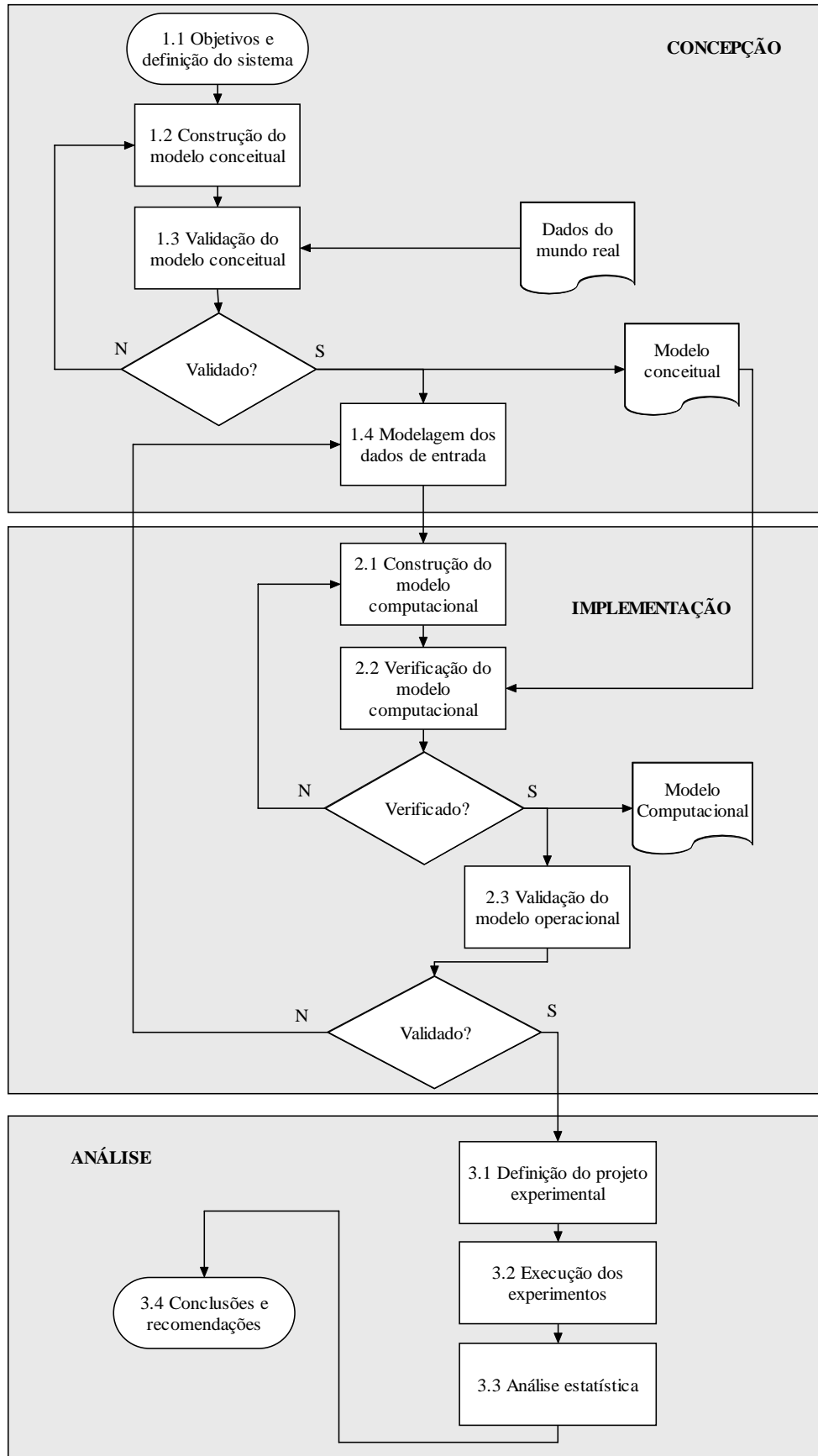


Figura 4 – Condução da pesquisa experimental através de experimentos simulados



A variável de saída analisada será o número de peças produzidas (conformes) em um período de 8 horas de trabalho. Serão consideradas cinco falhas para este sistema.

### Construção do modelo conceitual

Devido às características do sistema hipotético, os pesquisadores julgaram desnecessário o uso de técnicas de mapeamento de processos com uma variedade maior de símbolos. Para os objetivos estipulados, o nível de detalhamento necessário demonstrado na Figura 5 é suficiente.

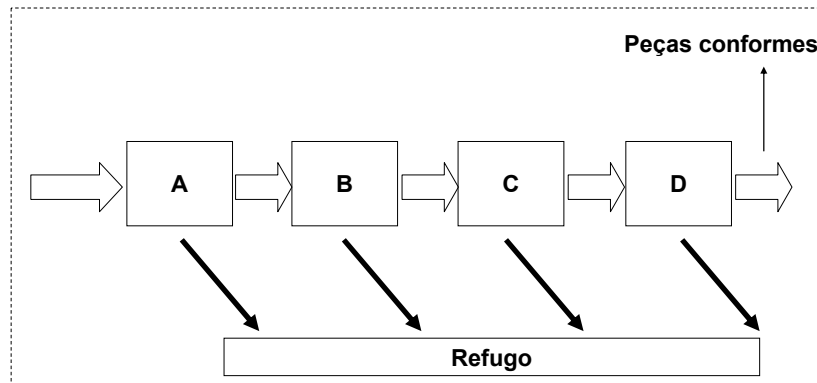


Figura 5 – Modelo conceitual do processo

Na Figura 5 pode-se observar a presença de quatro postos de trabalho, nomeados de posto A, posto B, posto C e posto D. Depois de realizadas as operações, cada posto de trabalho envia as peças não conformes até uma área de refugo. Estas peças não retornarão à linha de montagem. As peças conformes seguem o caminho do processamento até o término das operações no posto D, onde são registradas na variável número de peças produzidas.

Torna-se necessário a partir deste momento um modelo conceitual para representação da lógica das falhas. Para isto, a Figura 6 demonstra as falhas consideradas através da técnica FTA. Entre parênteses, segue registrado o posto de trabalho onde o efeito da falha é percebido.

### Validação do modelo conceitual

Segundo Chwif e Medina (2006), a validação do modelo conceitual se dá através do confronto do modelo conceitual com o sistema do mundo real. A análise deste confronto é favorecida quando se dispõe da participação de especialistas do sistema real, que podem avaliar os modelos conceituais. Como esta pesquisa contempla um sistema hipotético, este passo ficará registrado como uma orientação a pesquisas com sistemas reais.

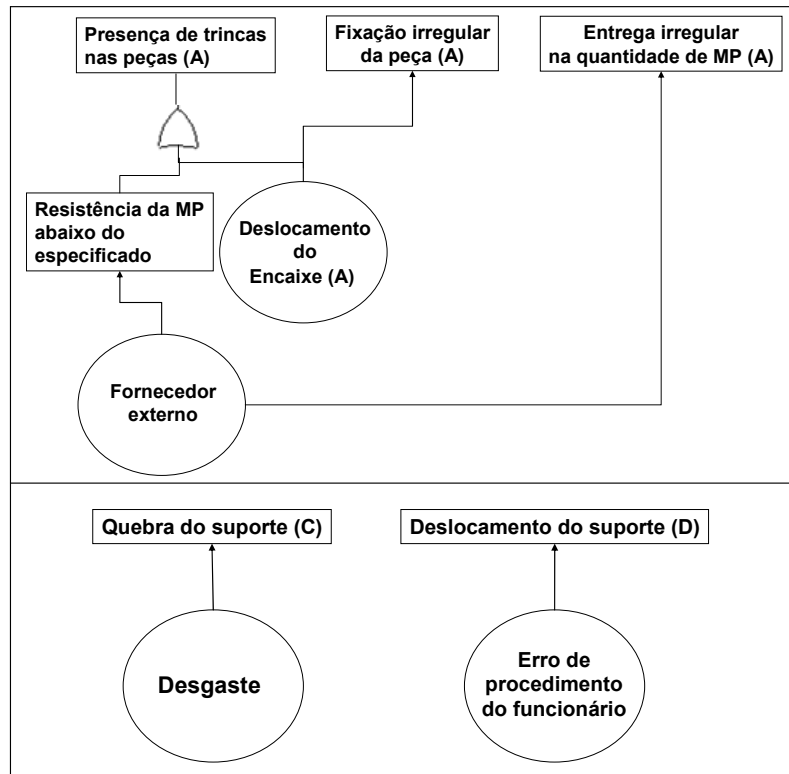


Figura 6 – Modelo conceitual das falhas. OBS.: MP = matéria prima

### Modelagem dos dados de entrada

Por se tratar de um sistema hipotético, toda a fase de coleta de tempos não será abordada neste trabalho, já que os tempos foram propositalmente inseridos no modelo. Os dados foram obtidos em pesquisas já realizadas pelo primeiro autor, em trabalhos de campo de pesquisa e desenvolvimento. O fato é que o modelo conceitual do processo possibilita a análise das entradas e saídas e pontos corretos para a realização das cronometragens. Após um tratamento estatístico, estes tempos são representados na forma de distribuições.

Três variáveis de entrada foram determinadas nesta fase:

- a) tempo de processamento: tempo gasto para processar cada peça. A cada posto de trabalho foi atribuída uma variável de tempo de processamento, definida como uma distribuição normal, caracterizada por um valor médio e um desvio padrão, nesta ordem. Os tempos de processamento, para os postos A, B, C e D, nesta ordem, em regime normal de funcionamento, são os seguintes:  $N(10,3)$  min;  $N(10,2)$  min;  $N(15,2)$  min;  $N(4,1)$  min;
- b) índice de refugo: em condições normais de operação, será considerado um índice de 5% de refugo, para cada posto de trabalho;
- c) taxa de abastecimento: o posto A será abastecido de matéria prima a uma taxa de 7 peças por hora.

Para inserir as falhas no modelo, torna-se necessário compreender como os efeitos de cada falha afetam as variáveis de entrada do modelo. A obtenção destas informações depende fortemente do registro de ocorrência de falhas adotado pelas empresas.

Um ponto interessante na Figura 6 é o portal lógico OU. A falha “presença de trincas nas peças” é ocasionada pela causa “resistência da MP abaixo do especificado”, ou pela causa “deslocamento do encaixe”, ou mesmo pela ocorrência simultânea destas duas

causas. A questão é analisar se o efeito da falha “presença de trincas nas peças” pode se alterar dependendo da causa geradora, ou mesmo da interação das causas geradoras.

Duas situações podem ser consideradas. Na situação 1, diferentes eventos (falha ou causa) afetam diferentes variáveis de entrada no modelo. Pode-se citar como exemplo o caso onde um evento *i* afeta a variável tempo de processamento, enquanto o evento *j* afeta a variável índice de refugos. Mais uma vez vale lembrar que é importante um banco de informações a respeito dos efeitos das falhas ocorridas. Este banco de informações será uma das fontes de alimentação do modelo computacional.

Na situação 2, dois diferentes eventos produzem efeitos na mesma variável de entrada do modelo. Além do conhecimento do efeito causado na variável por cada um dos eventos, de forma isolada, torna-se necessário conhecer os efeitos gerados na variável quando os eventos atuam de forma conjunta (interação). Os efeitos provocados nas variáveis de saída do modelo serão gerados na simulação.

Através da Tabela 1 é possível construir as relações entre os eventos considerados, as variáveis de entrada afetadas e o efeito.

Tabela 1 – Relação entre causa x falha x variável afetada x efeito

Causa	Falha	Variável de entrada afetada	Efeito
Fornecedor externo	Presença de trincas nas peças	Índice de refugo do posto A	30% das peças produzidas no posto A são refugo.
	Entrega irregular na quantidade de MP	Taxa de abastecimento do posto A	Abastecimento no posto A cai para 7 peças a cada 70 minutos
Deslocamento do encaixe	Presença de trincas nas peças	Índice de refugo do posto A	15% das peças produzidas no posto A são refugo.
	Fixação irregular da peça	Tempo de processamento do posto A	Tempo de processamento do posto A sobe para $N(15,3)$ min por peça.
Interação “Fornecedor externo” e “Deslocamento do encaixe”	Presença de trincas nas peças	Índice de refugo do posto A	50% das peças produzidas no posto A são refugo.
Desgaste	Quebra do suporte	Tempo de processamento do posto C	Paralisação do posto C por 1 hora.
Erro de procedimento do funcionário	Deslocamento do suporte	Tempo de processamento do posto D	Tempo de processamento do posto D sobe para $N(7,2)$ min por peça.
		Índice de refugo do posto D	20% das peças produzidas no posto D são refugo.

## 5.2 IMPLEMENTAÇÃO

### Construção do modelo computacional

Foi utilizado o software Promodel®, representado na Figura 7, para a confecção do modelo computacional. As razões da escolha deste software para este trabalho se devem, sobretudo, ao uso da animação gráfica, uma importante aliada na verificação do modelo. Da mesma forma, trabalhos como de Verma *et al.* (2000) justificam o uso do Promodel® pela

possibilidade do pesquisador analisar a simulação através do acompanhamento da animação, sendo de fácil aplicação e interpretação.

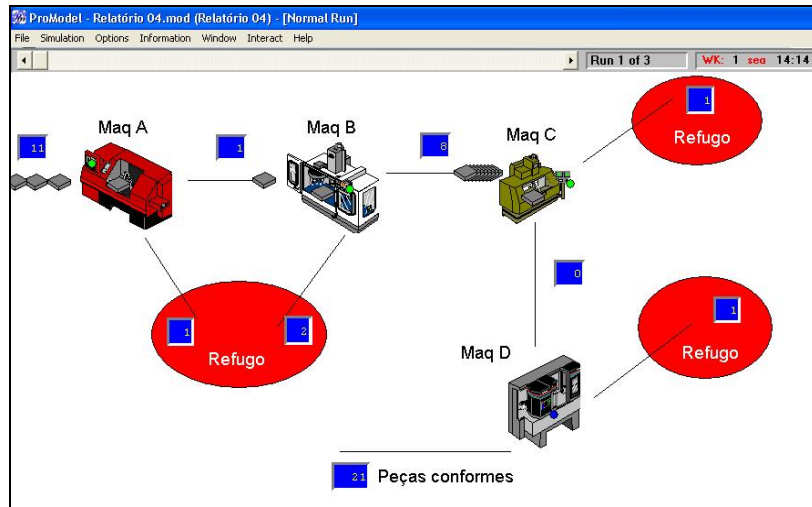


Figura 7 – Modelo computacional representado no software Promodel

### Verificação do modelo computacional

Foram utilizadas três técnicas de verificação: uso inicial de valores constantes ou simplificados, utilização do depurador e animação gráfica.

### Validação do modelo operacional

Após verificado, o modelo torna-se operacional. Como neste caso o sistema é hipotético, este passo ficará apenas como informativo. Maiores detalhes podem ser consultados no item 3 deste artigo.

## 5.3 ANÁLISE

### Definição do projeto experimental

Antes da execução dos experimentos simulados, torna-se necessário o projeto destes experimentos, através da técnica do DOE. Como o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito combinado de falhas no número de peças conformes produzidas em um turno de 8 horas, serão considerados 4 fatores: fator A (fornecedor externo), fator B (deslocamento do encaixe), fator C (desgaste) e fator D (erro de procedimento do funcionário). A ocorrência de cada um destes fatores leva ao surgimento de efeitos em 6 variáveis de entrada, como mostra a Tabela 1. Serão considerados então 4 fatores operando em 2 níveis cada um: a causa ocorre (nível +) ou não ocorre (nível -). Neste último caso, o sistema opera em condições normais.

Como há o interesse em se estudar as interações entre os fatores, utilizou-se um fatorial completo  $2^k$ . Desta forma, tem-se então 16 rodadas (experimentos) a serem executadas ( $2^4$ ), sendo cada uma com 3 replicações, perfazendo um total de 48 simulações. A variável de resposta (Y) considerada foi o número de peças conformes produzidas em um turno de 8 horas.

### Execução dos experimentos

A execução dos experimentos se dá de forma a atender a matriz experimental desenhada, como mostra a Tabela 2. Cada uma das 16 rodadas exige um *setup* inicial, respeitando os níveis (+) e (-). Para cada rodada, realiza-se 3 replicações, obtendo-se 3 resultados para a variável de resposta. Obtém-se então a média e variância destes valores.

Tabela 2 – Matriz experimental  $2^4$ , para os fatores A, B, C e D.

Exp	A	B	C	D	Peças conformes				
					rep 1	rep 2	rep 3	Y médio	Variância
1	-	-	-	-	28	26	26	26,67	1,33
2	+	-	-	-	26	24	23	24,33	2,33
3	-	+	-	-	22	22	21	21,67	0,33
4	+	+	-	-	13	14	12	13,00	1,00
5	-	-	+	-	23	23	23	23,00	0,00
6	+	-	+	-	20	18	23	20,33	6,33
7	-	+	+	-	21	19	16	18,67	6,33
8	+	+	+	-	14	13	12	13,00	1,00
9	-	-	-	+	21	21	22	21,33	0,33
10	+	-	-	+	22	21	23	22,00	1,00
11	-	+	-	+	18	20	17	18,33	2,33
12	+	+	-	+	8	9	11	9,33	2,33
13	-	-	+	+	19	25	18	20,67	14,33
14	+	-	+	+	20	21	21	20,67	0,33
15	-	+	+	+	18	16	15	16,33	2,33
16	+	+	+	+	10	10	10	10,00	0,00

### Análise estatística

A partir dos resultados gerados na Tabela 2, torna-se possível determinar todos os efeitos dos fatores e de suas interações sobre a variável de resposta (para análise do procedimento de cálculo dos efeitos ver Montgomery (2001)).

Os efeitos principais e as interações de segunda, terceira e quarta ordem estão representados na Tabela 3. O efeito negativo implica que o resultado da variável de resposta tende a aumentar quando o nível (-) ocorre. De maneira inversa, podemos concluir que, em efeitos negativos, a ocorrência da causa da falha tende a diminuir o número de peças produzidas e conformes. O bom senso mostra que não há sentido em afirmar que o número de peças produzidas pode aumentar com a ocorrência das falhas. Pressupõe-se então que os efeitos positivos não devem ser significantes.

A constatação se o efeito é significativo ou não pode ser realizada através de um teste t (Triola, 1999). Partindo-se de uma variância global ( $Sp^2$ ), onde

$$\text{Variância Global (Sp}^2\text{)} = \frac{\sum v_i \cdot s_i^2}{\sum v_i} \quad (1)$$

sendo que  $v_i$  refere-se ao número de graus de liberdade e  $s_i$  à variância. Pode-se obter então o erro experimental  $Sp$  ( $Sp = 1,6139$ ).

Considerando um grau de confiança de 95%, e trabalhando com 32 graus de liberdade, tem-se da tabela 3 que  $t_{\text{crítico}} = 1,960$ . Sabendo-se que

$$t = \frac{\text{Módulo (Efeito)}}{Sp} \quad (2)$$

Considera-se então que, para  $t \geq t_{\text{crítico}}$ , o efeito é significativo para a confiança adotada. Desta forma, são significantes os efeitos dos fatores A, B e de sua interação AB.

Tabela 3 – Efeito sobre a variável de resposta dos fatores principais e suas interações, e o valor de t para cada efeito.

1ª ordem	Efeito	t	3ª ordem	Efeito	t
A	-4,25	2,633	ABC	0,83	0,516
B	-7,33	4,544	ABD	-0,83	0,516
C	-1,75	1,084	ACD	-0,08	0,051
D	-2,75	1,704	BCD	-0,5	0,309
2ª ordem	Efeito	t	4ª ordem	Efeito	t
AB	-3,17	1,962	ABCD	0,00	0,000
AC	0,58	0,361			
AD	0,58	0,361			
BC	0,67	0,413			
BD	-0,33	0,206			
CD	0,92	0,568			

### Conclusões e recomendações

A ocorrência de problemas no fornecedor externo e o deslocamento do encaixe no posto de trabalho A afetam de forma significativa o número de peças conformes, produzidas em um turno de 8 horas, de forma a reduzir esta quantidade produzida, sobretudo o deslocamento do encaixe em A. O efeito da interação destas duas causas de falha também é significativo sobre o número de peças conformes produzidas. Não há evidências de que outras possíveis interações tenham impacto sobre o número de peças conformes produzidas, o que permite um direcionamento de esforços no sentido de controlar os fatores A e B.

## 6. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o uso integrado da simulação e do projeto de experimentos fornece uma abordagem capaz de avaliar o impacto dos efeitos de falhas em sistemas produtivos.

A possibilidade de avaliar de forma quantitativa o impacto da falha sobre variáveis de saída do modelo vem a ampliar os horizontes de análise, auxiliando assim no processo de tomada de decisões. Na maioria dos casos reais, as variáveis afetadas por falhas são interdependentes e definidas na forma de distribuições de probabilidade. Portanto, o projeto de experimentos de forma simulada se mostrou uma forma eficiente de análise.

Outro aspecto interessante foi a possibilidade de se avaliar o efeito da interação de falhas. Casos podem ocorrer onde falhas isoladas têm pouco impacto na produção, mas com efeitos de interação danosos. Estas interações devem ser analisadas, principalmente quando existem falhas com causas de diferentes origens, como humanas, oriundas de equipamentos, procedimentos ou mesmo na matéria prima.

A escolha do projeto experimental fatorial completo possibilita esta análise de todas as possíveis interações. Porém, na medida em que o número de fatores aumenta, o cálculo começa a se tornar inviável. Uma alternativa possível é o trabalho com projetos experimentais fracionados, seguido de uma análise de fatorial completa para os fatores de efeito significativo.

A realização de experimentos com falhas se mostrou apta em ambientes simulados. Assim como em qualquer modelo de simulação, é necessária uma entrada de dados confiáveis. O registro de informações sobre a ocorrência de falhas e seus efeitos possibilita

a criação de modelos mais confiáveis, possibilitando uma análise mais apurada. Apesar de o presente artigo contemplar um sistema hipotético, sua aplicação em casos reais se mostra possível através dos passos apresentados, possibilitando assim um grande apoio no processo de tomada de decisões.

#### **AGRADECIMENTOS**

Aos programas de Pós-Graduação da Unesp (Guaratinguetá-SP) e Unifei (Itajubá-MG) que, através de um convênio, possibilitaram a realização desta pesquisa, tema de tese de doutorado.

A FAPEMIG por apoio à pesquisa.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BANKS, J. **The Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1998.

BANKS, J. Education for simulation practice: five perspectives. In: **Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference**, Arlington, VA.

BISGAARD, S.; FULLER, H. **Analysis of Factorial Experiments with defects or defectives as the response**. Center for Quality and Productivity Improvement, University of Wisconsin, Report n. 119, 1994.

CHUNG, C.A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. Industrial and manufacturing engineering series, Washington, D.C: CRC press, 2004.

CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. Tese (Doutorado em Engenharia), São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, 1999.

CHWIF, L.; MEDINA, A.C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Ed. dos Autores, 2006.

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

HARREL, C.; TUMAY, K. **Simulation Made Easy**. Engineering & Management press, 1994.

HARREL, C. R.; BATEMAN, R. E.; GOGG, T. J.; MOTT, J. R. A. **System Improvement Using Simulation**. PROMODEL Corporation, Orem, Utah, 1996.

HLUPIC, V.; PAUL, R.J. Methodological approach manufacturing simulation selection. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v.9, n.1, p.49-55, 1996.

KLEIJNEN, J. P. C. Verification and validation of simulations models. **European Journal of Operational Research**, v.82, n.1, 1995.

KLEIJNEN, J.P.C.; SANCHEZ, S.M.; LUCAS, T.W.; CIOPPA, T.M. State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. **Journal on Computing**, v.17, n.3, p.263-289, 2005.

LAW, A. Simulation model's level of detail determines effectiveness. **Industrial Engineering**, v.23, n.10, p.16-18, 1991.

LAW, A.M.; KELTON, D.W. **Simulation, modeling and analysis**. New York: McGraw-Hill, 2 ed., 1991.

LEAL, F.; MONTEVECHI, J.A.B; PINHO, A.F. de; ALMEIDA, D.A. de; MARINS, F. A. S.; OLIVEIRA, J.B. de. Análise da capacidade de produção e dimensionamento de estoques no estudo de um novo processo de manufatura através da simulação de eventos discretos. In: **Anais do XXXVIII SBPO**, Goiânia, GO, 2006.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, 5 ed., 2001.

PRICE, C.J.; TAYLOR, N.S. Automated multiple failure FMEA. **Reliability Engineering & System Safety**, v.76, 2002.

PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; LA FUENTE, D. de. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.19, n.2, p.137-150, 2002.

RAUSAND, M.; OIEN, K. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v.53, p.73-83, 1996.

ROQUE-SPECHT, V. F. **Desenvolvimento de um Modelo de Gerenciamento de Riscos para o Aumento da Segurança Alimentar - Estudo de Caso em Indústria de Laticínios**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

RYAN, J.; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. **Computers in Industry**, v.57, p. 437-450, 2006.

SARGENT, R.G. Validation and verification of simulation models. In: **Proceedings of the 1992 Winter Simulations Conference**, Arlington, VA.

SCAPIN, C.A. **Análise Sistêmica de Falhas**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

SHALEV, D.M.; TIRAN, J. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations. **Reliability Engineering and System Safety**, v.92, p.1231-1241, 2007.

SHEPPARD, S. Applying software engineering to simulation. **Simulation Practice and Theory**, v.10, n.1, p. 13-19, 1983.

STAMATIS, D.H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution**. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2. ed., 2003.



SUN, Y.; MA, L.; MATHEW, J.; ZHANG, S. An analytical model for interactive failures. **Reliability Engineering & System Safety**, v.91, p. 495–504, 2006.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 7. ed., 1999.

VERMA, R.; GIBBS, G.D.; GILGAN, R.J. Redesigning check-processing operations using animated computer simulation. **Business Process Management**, v.6, n.1, p. 54-64, 2000.

YILMAZ, L.; BALCI, O. Object-oriented simulation model verification and validation. In: **Proceedings of the 1997 Summer Computer Simulation Conference**, San Diego, CA.

## Using the design of simulation experiments to failures interactive effects analysis in process: a hypothetical case

Fabiano Leal <sup>1,2</sup>, fleal@unifei.edu.br

Dagoberto Alves de Almeida <sup>1</sup>, dagoberto@unifei.edu.br

José Arnaldo Barra Montevechi <sup>1</sup>, montevechi@unifei.edu.br

Fernando Augusto Silva Marins <sup>2</sup>, fmarins@feg.unesp.br

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, SP, Brasil

\*Received: October, 2007 / Accepted: December, 2007

### ABSTRACT

*This work presents a failures interactive effects analysis in a process, by means of simulations experiments. The chosen process is a hypothetical system, simulated through software Promodel®. Two conceptual models are generated, representing the system (mapping process) and the failures considered in system (Fault Tree Analysis). These conceptual models are translated in a computerized model, for the analysis of individual and combined effects on the variable "number of produced pieces". This experimentation is designed through DOE (Design of Experiments), verifying if main and combined effects among process failure, for a defined significance level, may be accepted or rejected.*

**Keywords:** Interactive failures. Discrete Event Simulation. Design of Experiments.

---