

APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS SIMULADOS PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÕES EM UMA CÉLULA DE MANUFATURA DE ALTA TECNOLOGIA

José Arnaldo Barra Montevechi^{a*}, Rafael Florêncio da Silva Costa^a,

Rafael de Carvalho Miranda^a, Alexandre Ferreira de Pinho^a

^aUniversidade Federal de Itajubá (UNIFEI) – Itajubá – MG, Brasil

Resumo

O interesse pelo uso combinado da simulação a eventos discretos e do planejamento de experimentos para auxiliar a tomada de decisões cresceu na última década. Nesta linha, este artigo apresenta uma aplicação do uso combinado destas técnicas para identificar os fatores e interações que mais impactam no total produzido de uma célula de manufatura, de uma empresa brasileira de alta tecnologia. Para tanto, um modelo de simulação foi construído para representar a célula de manufatura. O delineamento de experimentos foi empregado para conduzir a experimentação do modelo e análise dos resultados. Foram testados 64 cenários para a célula no modelo de simulação, os quais seriam impraticáveis sem auxílio da simulação. Com a aplicação do planejamento de experimentos foi possível identificar os fatores significativos, bem como a presença de interações que impactam no total produzido. O resultado da combinação destas técnicas permitiu aos tomadores de decisão identificar e ordenar os cenários mais relevantes para aumentar a produção, entre os 64 possíveis, evitando o processo de tentativa e erro.

Palavras-chave: Simulação a eventos discretos, Planejamento de experimentos, Sistemas de Manufatura.

Abstract

The interest in the joint use of discrete event simulation (DES) with design of experiments (DOE) in order to aid in decision making in manufacturing systems has been on the rise in the past decade. This way, this paper presents an application combining the two techniques to identify the factors and interactions that most impact in the monthly output of a high technology Brazilian company's production cell. In order to do that, a simulation model was built to mimic the production cell and the design of experiments was used to lead the experimentation with the model and results analysis. Then, 64 manufacturing cell's scenarios were tested using the simulation model. The execution of these scenarios would be impractical without using a simulation model. The significant factors and the interactions that most influence in the monthly output were identified through the application of the design and analysis of experiments. Therefore the combination of the two techniques allowed the decision makers to identify and rank the most relevant scenarios in order to increase the production output, among the 64 possible ones, avoiding the trial and error practice.

Key-words: Discrete event simulation, Design of experiments, Manufacturing systems.

*Autor para correspondência: e-mail: montevechi@unifei.edu.br

1. Introdução

De acordo com Harrel, Ghosh e Bowden (2004), a simulação pode ser definida como a imitação de um sistema dinâmico, usando um modelo computacional para avaliar e melhorar o desempenho deste sistema. Nesse sentido, para de Banks (1998), a simulação envolve a criação de uma história artificial de um sistema real ao longo do tempo, e a observação desta história para fazer inferências a respeito das características da operação do sistema real representado.

Nesse sentido, a simulação tem sido empregada de forma crescente para auxiliar a tomada de decisões por meio da modelagem, análise e projeto de sistemas complexos, a fim de caracterizar o impacto de mudanças de parâmetros no desempenho do sistema (BANKS *et al.*, 2005; GARZA-REYES *et al.*, 2010; SARGENT, 2009).

Law (2009) destaca o fato de a simulação ser uma alternativa à experimentação direta no sistema real. Segundo este autor, a realização de experimentos no sistema existente pode gerar altos custos, comprometer prazos de entrega de produtos, alocação de pessoas e recursos ou até mesmo ser impraticável.

Nesse sentido, Kleijnen *et al.* (2005) afirmam que muitos praticantes de simulação podem conseguir mais de suas análises por meio da aplicação do planejamento de experimentos (DOE). Os benefícios do planejamento 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 (MONTEVECHI *et al.*, 2007).

Para Kelton (2003), o planejamento de experimentos simulados apresenta muitas oportunidades para melhorias, que são difíceis, ou impossíveis de serem utilizadas em experimentos físicos.

Sendo assim, conhecidos os benefícios do uso da simulação e do planejamento de experimentos como suporte à tomada de decisão, o objetivo deste trabalho foi identificar

quais os fatores e interações mais impactam no total produzido mensal de uma célula de manufatura de uma empresa brasileira de alta tecnologia. Para tanto, experimentos planejados foram conduzidos, a partir de um modelo de simulação a eventos discretos, validado estatisticamente.

O presente trabalho está organizado em quatro seções. A primeira já apresentada contemplou a introdução deste trabalho e a contextualização do problema de pesquisa. A segunda seção apresenta o método de pesquisa utilizado no desenvolvimento do trabalho. A terceira seção apresenta a aplicação do método e os resultados obtidos. Por fim, a quarta seção traz as conclusões gerais desse trabalho.

2. Método de Pesquisa Modelagem e Simulação

Segundo a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), pode-se classificar este trabalho como uma pesquisa aplicada, baseada em modelagem quantitativa. Esta classificação é atribuída às pesquisas nas quais os modelos de relações causais entre variáveis de controle e as variáveis de desempenho são desenvolvidas, analisadas ou testadas e se alteram sobre um domínio específico.

Possui ainda, objetivo empírico descritivo, uma vez que objetiva criar um modelo que descreva adequadamente as relações causais que podem existir na realidade, levando à compreensão dos processos atuais, sendo o método de pesquisa a modelagem e simulação.

No método de pesquisa modelagem e simulação, o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis, mas não na realidade. Isto é feito em um modelo de simulação (MARTINS, 2010). Segundo Chung (2004), este método envolve a criação de um modelo de um sistema físico e sua experimentação.

A literatura apresenta diversas estruturas para conduzir um estudo de simulação (BANKS, 1998; BANKS *et al.*, 2005; CHWIF e MEDINA, 2010; LAW, 2009;

MONTEVECHI *et al.*, 2007; SARGENT, 2009). Neste trabalho, adotou-se o fluxograma da Figura 1, proposto por Montevechi *et al.* (2010).

Este fluxograma contém as principais atividades de um projeto de simulação, e é prático para guiar o modelador durante o projeto, uma vez que traz uma sequência lógica de etapas a serem cumpridas. Neste fluxograma, os autores destacam que o desenvolvimento de um modelo de simulação passa por três grandes etapas: concepção, implementação e análise.

Na fase de concepção, os analistas de simulação e os especialistas do processo se reúnem, definem claramente o sistema a ser simulado, os objetivos do projeto, o escopo do estudo e também o nível de detalhamento necessário para o modelo. Em seguida, o modelo conceitual pode ser construído com o objetivo de representar a essência do sistema existente, facilitando a construção do modelo computacional.

Algumas técnicas utilizadas para construir o modelo conceitual em pesquisas envolvendo simulação são: mapeamento *Lean* (ABDULMALEK e 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 e MONTEVECHI, 2008; MONTEVECHI *et al.*, 2010).

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

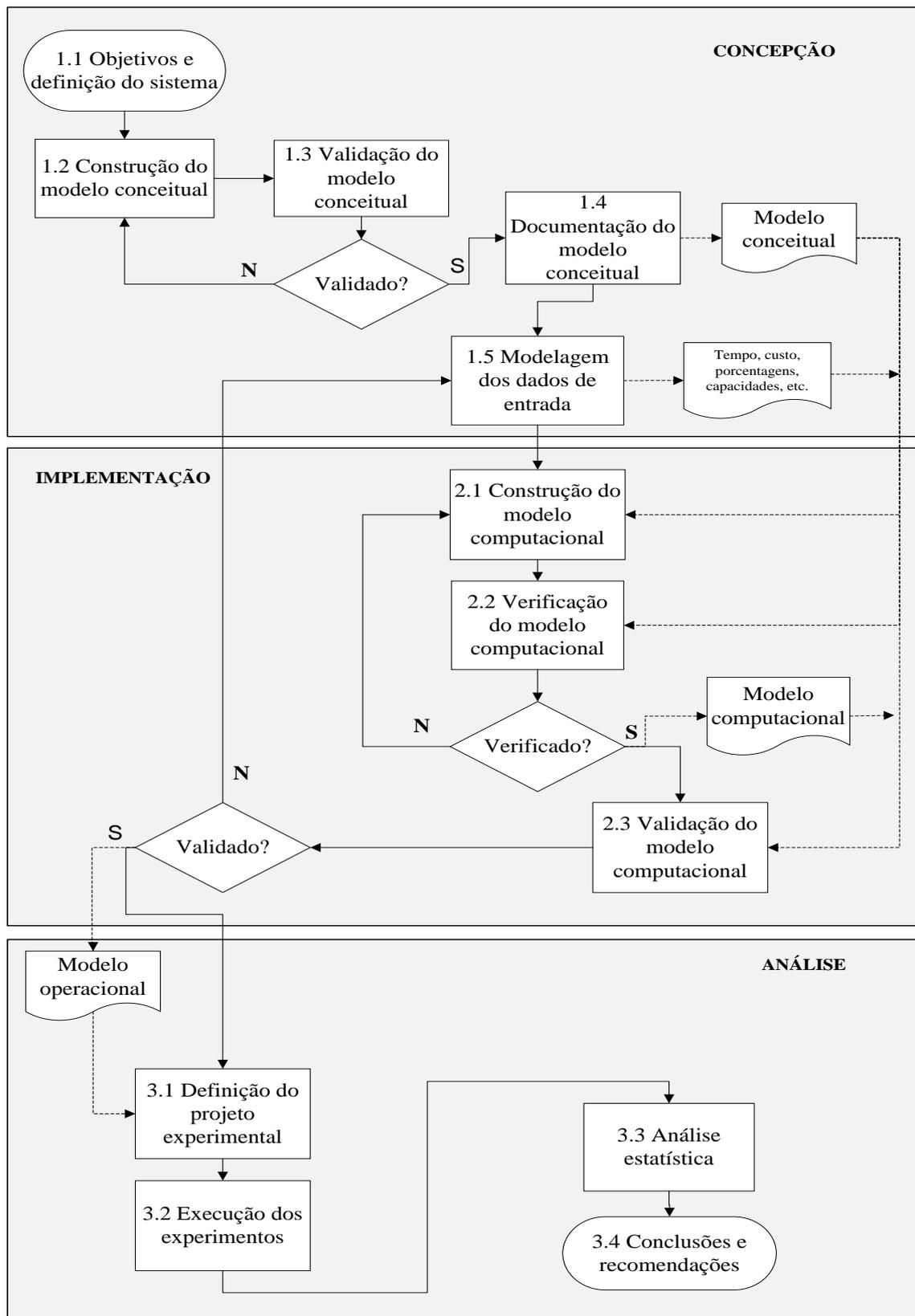


Figura 1. Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho
 Fonte: Montevechi et al. (2010)

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Uma vez que o modelo conceitual foi construído, os dados de entrada são coletados e ajustados a uma distribuição de probabilidade, que alimenta o modelo computacional. Ressalta-se que o modelo de simulação será confiável se os dados de entrada também forem.

Na fase de implementação, o modelo conceitual é convertido em modelo computacional, por meio da programação em uma linguagem de simulação ou um software de simulação.

Em seguida, o modelo computacional deve passar por dois procedimentos fundamentais em um estudo de simulação: a validação e a verificação. A validação consiste em aceitar ou não o modelo como uma boa representação do sistema real. Por sua vez, a verificação consiste em se comprovar que o modelo conceitual foi corretamente traduzido em um modelo computacional. Em outras palavras, verificar se o modelo está sendo construído de forma correta. Estudos específicos sobre verificação e validação de modelos podem ser encontrados em Balci (2003), Kleijnen (1995) e Sargent (2011).

Na fase de implementação, o modelo conceitual é convertido em modelo computacional, por meio da programação em uma linguagem de simulação ou um software de simulação.

Em seguida, o modelo computacional deve passar por dois procedimentos fundamentais em um estudo de simulação: a validação e a verificação. A validação consiste em aceitar ou não o modelo como uma boa representação do sistema real. Por sua vez, a verificação consiste em se comprovar que o modelo conceitual foi corretamente traduzido em um modelo computacional. Estudos específicos sobre verificação e validação podem ser encontrados em Balci (2003), Kleijnen (1995) e Sargent (2011).

Por último, mas não menos importante, a fase de análise. Uma vez que o modelo foi verificado e validado, ele está apto a receber experimentos, dentro dos limites de validação. 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 ter o modelo trabalhando para o modelador.

Ryan e Heavey (2006) afirmam que raramente estas fases são totalmente independentes. Entretanto, os mesmos autores apresentam a regra “40-20-40”. Segundo esta regra, durante o desenvolvimento de um modelo, o tempo do analista deveria ser dividido em:

- 40% para a concepção, ou seja, para a definição do problema, criação do modelo conceitual, obtenção de dados necessários e preparação dos dados de entrada;
- 20% para a implementação, ou seja, para converter o modelo conceitual em modelo computacional, verificar e validar;
- 40% para análise, ou seja, para experimentação com o modelo verificado e validado, planejamento experimental final, análise, interpretação dos dados de saída e documentação.

4. Aplicação do Método no Objeto de Pesquisa

4.1 Concepção

O objeto de estudo deste trabalho é uma célula de manufatura de uma empresa de alta tecnologia, a Padtec. Na célula em questão são produzidos *transponders* ópticos.

A Padtec é uma empresa brasileira de alta tecnologia que trabalha com o desenvolvimento, fabricação e comercialização de sistemas de comunicação ópticos. A produção é organizada em seis células, sendo cada uma delas responsável por determinadas famílias de produtos. A célula de *transponders* foi escolhida, pois dentre todas as células da empresa, é a mais representativa em termos de quantidade produzida e valor agregado às receitas.

Inicialmente, um modelo conceitual de simulação foi construído por meio da técnica

IDEF-SIM (LEAL, ALMEIDA e MONTEVECHI, 2008; MONTEVECHI *et al.*, 2010).

Visando abordar a carência na literatura por uma técnica de mapeamento voltada a simulação, os autores desenvolveram uma abordagem de modelagem conceitual especificamente para projetos de simulação.

Nesta técnica, os autores propõem o uso combinado de elementos do IDEF3, IDEF0 e fluxograma. A simbologia designada para IDEF-SIM possibilita a tradução direta do modelo conceitual para a programação computacional, incluindo símbolos de componentes convencionais de muitos softwares de simulação, tais como: entidades, recursos, funções, fluxo, controles, regras lógicas e identificação de transportes e movimentação. A Figura 2 apresenta o modelo conceitual construído em IDEF-SIM, bem como a simbologia empregada na técnica.

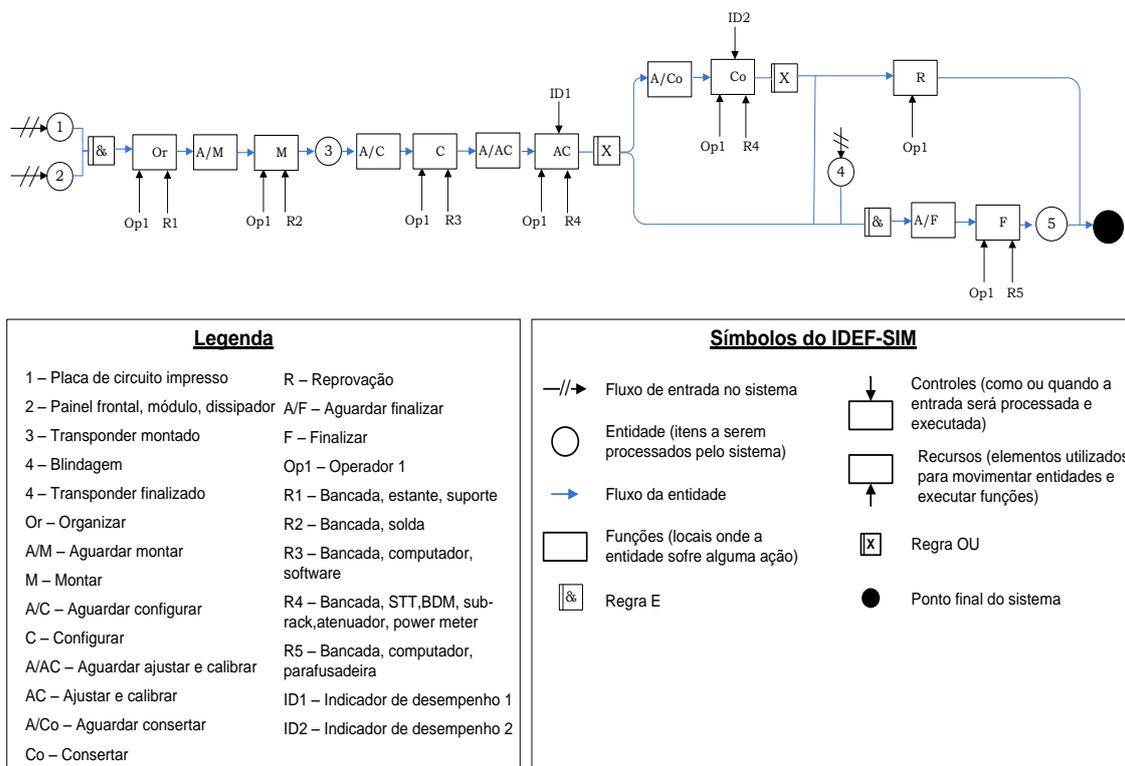


Figura 2. Modelo conceitual

De acordo com a Figura 2, as entidades placa de circuito impresso (1) e matérias-primas (2) chegam ao sistema e são levadas pelo colaborador (Op 1) até a atividade

organizar (Or). O colaborador organiza (Or) esses materiais (1 e 2) na bancada e na estante (R1). Em seguida, as matérias-primas (2) são montadas (M) na placa de circuito impresso (2), por meio da ação do colaborador (Op 1) trabalhando na bancada, resultando no *transponder* montado (3).

O *transponder* montado é configurado (C) e ajustado (AC) pelo colaborador (Op 1) utilizando os equipamentos necessários (R3 e R4). Neste ponto do processo, um *transponder* montado (3) pode seguir para a atividade finalizar (F), onde será acrescentada a blindagem (4), ou pode precisar ser consertado (Co). Caso precise ser consertado pelo colaborador, um *transponder* (3) pode ser consertado e voltar para o fluxo normal, ou seja, seguir para finalizar (F); ou pode não ter conserto e seguir para o fornecedor (R), deixando o sistema.

Por fim, após ser finalizado, o *transponder* (5) é levado pelo colaborador (Op 1) para a célula de controle de qualidade (saída do sistema). Cabe ressaltar que antes de cada atividade principal do processo, foi identificado um estoque com produtos intermediários. Por exemplo, antes da atividade montar (M), existe um estoque intermediário aguardando montagem (A/M).

Construído o modelo conceitual, passou-se a validação. Analisando o modelo, os colaboradores afirmaram que as atividades executadas por eles estavam corretamente representadas. Em seguida, o modelo foi apresentado para a administração industrial, que o julgou como uma representação adequada do processo de produção da célula de *transponders*. Dessa forma, o modelo conceitual pode ser considerado como validado por meio da opinião dos colaboradores, administração industrial e equipe de simulação.

Desta forma, o modelo conceitual validado foi documentado e disponibilizado para toda a empresa, por meio da exposição na célula e na *intranet* da empresa. Com a documentação do modelo, qualquer mudança no processo, antes de ser implementada,

necessita ser modificada primeiramente no modelo conceitual documentado.

O modelo conceitual conduziu a coleta e modelagem dos dados de entrada para o modelo computacional. As atividades dos processos de montagem da célula são realizadas por colaboradores, portanto existe uma variabilidade associada ao trabalho humano, intrínseca a esses processos. Entretanto, a empresa não possuía amostras de tempos para cada atividade da célula. Deste modo, a fim de que o modelo computacional considerasse essa variabilidade dos tempos de execução das atividades, foi necessário cronometrar uma amostra dos tempos de execução para cada uma das atividades.

Esta cronometragem foi executada ao longo de quatro meses, considerando tempos durante a manhã, antes e após o almoço e durante a tarde. Não foram identificados os colaboradores cujos tempos foram tomados, apenas foi assegurado que todos os colaboradores tivessem seus tempos medidos.

Após essa cronometragem dos tempos, uma análise estatística foi realizada com esses dados, utilizando o software Minitab[®]. Inicialmente, diagramas de caixas (*box plots*) foram construídos a fim de se identificar valores não usuais (*outliers*) na amostra.

A Figura 3 mostra os diagramas de caixa para todas as atividades. Este diagrama é útil para a comparação entre as amostras de dados. Cabe ressaltar que o círculo vermelho nos diagramas representam a média da amostra e as retas horizontais dentro das caixas representam as medianas.

Em seguida, optou-se por testar a aderência de cada amostra à distribuição de probabilidades Normal (*Anderson-Darling*), considerando 95% de confiança. Esta opção pode ser justificada pela simplicidade de se trabalhar com a distribuição Normal, visto que a interpretação de seus parâmetros é facilmente conseguida, o que também ajuda na aceitação do modelo.

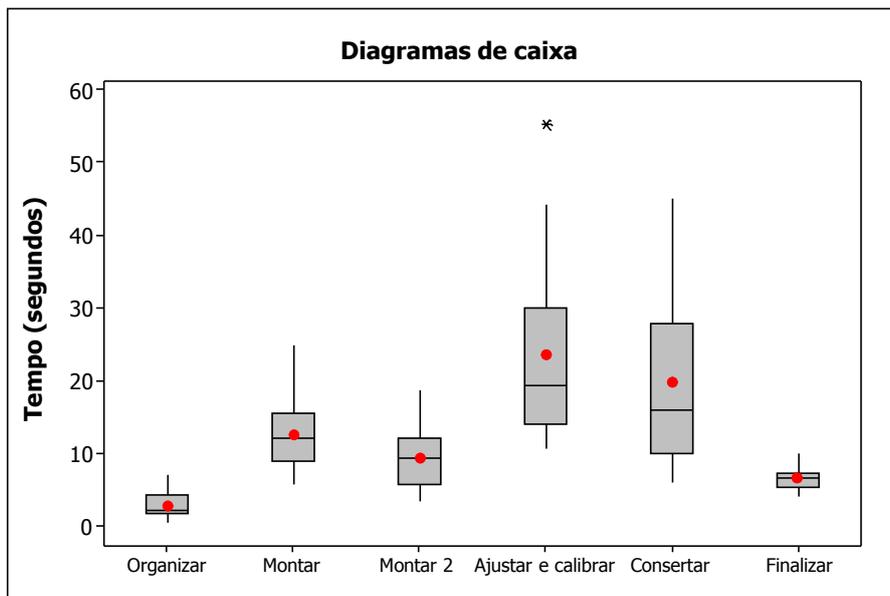


Figura 3. Diagramas de caixa para cada atividade da montagem de um produto

Em resumo, a Tabela 1 mostra o tamanho das amostras e os parâmetros da distribuição Normal para as seis atividades da célula. Devido ao tamanho das amostras serem em alguns casos inferiores a 30, o teste de *Anderson-Darling* (ANDERSON e DARLING, 1954) foi utilizado para testar a aderência a distribuição normal. Cabe ressaltar que, apesar de a distribuição Normal aceitar valores negativos, o simulador a eventos discretos possui recursos que evitam que um valor negativo seja associado a um valor de tempo, para um dado processo.

Tabela 1. Distribuição de probabilidades para cada atividade da célula

Atividade da célula	Distribuição de probabilidades (tempos em min)	Tamanho da amostra
Organizar	Normal (7.3, 4.7)	25
Montar um	Normal (12.6, 4.7)	24
Montar dois	Normal (10.7, 3.4)	34
Ajustar e Calibrar	Normal (25.9, 14.6)	26
Consertar	Normal (21.8, 12)	33
Finalizar	Normal (6.8, 1.4)	26

4.2 Implementação

Nesta etapa, um modelo de simulação é construído para imitar o funcionamento do sistema real, a partir do modelo conceitual validado e dos dados de entrada coletados. O simulador

escolhido para esta etapa foi o *Promodel*[®]. A Figura 4 apresenta a tela de animação do modelo de simulação final desenvolvido.

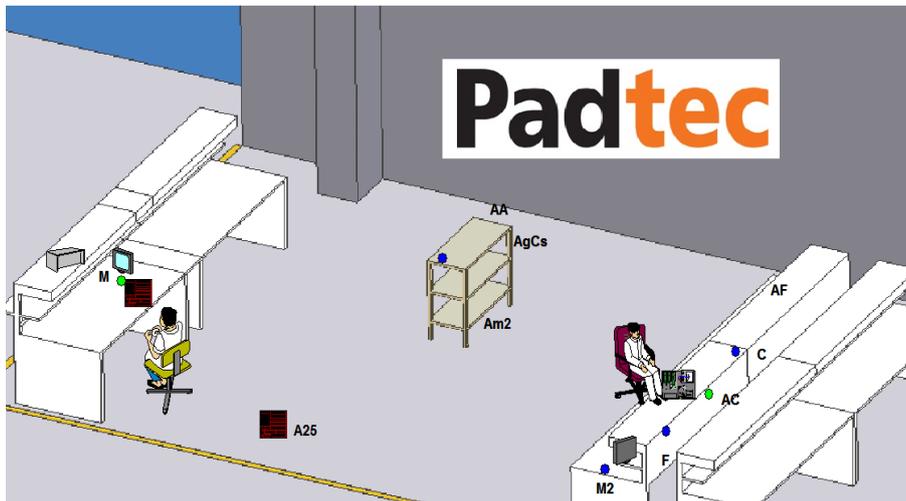


Figura 4. Tela da animação da simulação

Até se conseguir um modelo computacional validado, nove versões para o modelo foram construídas. Inicialmente, foi construído um modelo determinístico com os principais locais (*locations*), entidades (*entities*) e com a definição dos processos. Em seguida, os colaboradores foram acrescentados a este modelo. E, por fim, as lógicas dos processos foram programadas, sendo acrescentadas as distribuições de tempos e as taxas de custos.

Em cada um destes modelos foram utilizados recursos do simulador que auxiliaram na verificação do modelo, tais como:

- uso da função de verificação do código do modelo (*trace*), que exibe passo a passo a execução da animação da simulação com o objetivo de verificar se a lógica do modelo está correta;
- uso de contadores nos locais para verificar se sua capacidade atende o modelo;
- uso de indicadores de estado dos locais, que foram utilizados para verificar se uma atividade está em operação (cor verde), fora do turno (cor vermelha), ociosa (cor

azul), bloqueada (cor rosa) ou esperando por recursos (cor amarela).

Portanto, o modelo computacional foi verificado em cada versão e pode ser submetido ao processo de validação.

Existem diversas técnicas que podem ajudar a validar um modelo computacional. Este modelo foi validado por três técnicas: animação, validação face a face e validação estatística, utilizando um guia proposto por Leal *et al.* (2011).

Inicialmente, pela animação do modelo computacional (Figura 4), o comportamento operacional do modelo foi apresentado graficamente, à medida que o modelo evoluía com o tempo, eventuais erros puderam ser corrigidos. Para exemplificar, um colaborador deixava de realizar atividades de acabamento para realizar atividades iniciais do processo, enquanto o outro que só realiza atividades iniciais permanecia ocioso, o problema foi resolvido por meio da utilização de prioridades na execução das atividades dos colaboradores.

A partir dessa primeira validação, a equipe de simulação decidiu que apresentaria este modelo aos indivíduos que conhecem o processo para realização da validação face a face. Neste processo de validação, o modelo foi mostrado para três engenheiros do processo de produção da Padtec e para o diretor industrial, então esses indivíduos que conhecem o sistema foram questionados se o comportamento do modelo era aceitável. Com isso, os especialistas do processo validaram o modelo para os quatro produtos.

Cabe ressaltar, que a construção da biblioteca gráfica para a empresa, contendo o desenho do *layout* atual da célula, foi importante para que os gestores se familiarizassem com a execução das atividades do modelo.

Adicionalmente, um guia para validação operacional de modelos de simulação (LEAL *et al.*, 2011) foi utilizado para comparação dos resultados do modelo computacional com os dados históricos da empresa.

De acordo com o guia, devem-se elaborar os conjuntos “total produzido no sistema

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

real” e “total produzido no modelo de simulação”. Neste estudo, a variável escolhida para validação do modelo foi o total produzido por mês. Esta escolha pode ser justificada pela cultura da empresa de reportar, dentro do mesmo mês, todos os produtos que foram produzidos. Em outras palavras, produtos feitos em um determinado mês são reportados para aquele mês. O que não acontece com dia ou a semana, pois pode acontecer de *transponders* montados em uma semana serem reportados na outra semana.

Deste modo, o conjunto total produzido por mês, na célula de produção, foi obtido do sistema de ERP da empresa, no período de oito meses. Cabe ressaltar, que esse período foi escolhido porque corresponde ao desenvolvimento do estudo de simulação. Antes deste período, os processos de produção não estavam bem definidos e os tempos de execução das atividades não haviam sido coletados.

Para a definição do conjunto do total produzido no modelo de simulação, o modelo foi executado por um mês (20 dias), com sete replicações. A Tabela 2 traz estes conjuntos de dados.

Tabela 2. Produção mensal simulada x Produção mensal real

Produção mensal simulada	Produção mensal real
177	163
183	84
175	91
175	90
181	112
181	215
175	282
163	65

Após a elaboração dos conjuntos de dados para a validação, realizou-se um teste de aderência à distribuição normal de *Anderson-Darling* (ANDERSON e DARLING, 1954) para cada amostra. Foi constatado, que o conjunto do total produzido no sistema real apresentou *p-value* igual a 0,101 e o *p-value* do teste para o total produzido no modelo de simulação foi igual a 0,091, portanto, as duas amostras puderam ser ajustadas por

distribuições normais. Esta informação orienta a execução dos próximos testes estatísticos.

A partir desta informação, o Teste F foi realizado, a fim de testar a hipótese nula de igualdade de variâncias entre os dados reais e simulados (BROWN e FORSYTHE, 1974). Como o *p-value* do Teste F foi inferior a 0,05, foram encontradas evidências de diferença entre as variâncias. Esta informação não invalida o modelo, mas orienta a execução do Teste T.

Após a realização do Teste F, pode-se então realizar um Teste T para duas amostras independentes. Este teste avalia a igualdade de médias para os dados reais e simulados (TRIOLA, 2005). Para o caso deste objeto de estudo, o teste levará em consideração a não igualdade de variâncias, concluído a partir do Teste F.

O Teste T foi realizado com auxílio do *software Minitab®*, e apresentou *p-value* igual a 0,198 (superior ao nível de significância de 0,05). Dessa forma, o modelo de simulação pode ser considerado validado por meio de testes estatísticos, uma vez que comprova a igualdade de médias entre os dados do sistema real e simulado.

4.3 Análise

De posse de um modelo de simulação verificado e validado para representar a célula de montagem de *transponders*, pode-se utilizar este modelo para testar e avaliar percepções de melhorias ou cenários para expansão de capacidade produtiva para esta célula, evitando processos de tentativa e erro.

Sendo assim, em reunião realizada na empresa, ficou definido o interesse em avaliar o efeito de seis fatores sobre o total produzido por mês. Na Tabela 3, os fatores e seus níveis são apresentados. Estes fatores foram definidos em conjunto com os tomadores de decisão da empresa, a partir dos resultados provenientes da análise do modelo de simulação representando o estado atual da célula de *transponders* modelada.

Tabela 3 - Fatores e níveis

Fator	Descrição	Nível inferior ("-")	Nível superior ("+")
A	Adoção de um teste de componentes no fornecedor	não	sim
B	Equipamentos para atividade AC	1	2
C	Número de técnicos	1	2
D	Adoção da modificação no projeto	não	sim
E	Número de estagiários	1	2
F	Tempo médio da segunda montagem (min)	10.7	4

A partir da análise dos resultados do modelo de simulação, os níveis para cada um dos fatores apresentados foram definidos, sempre respeitando as observações realizadas pelo pessoal da empresa estudada e valendo-se dos resultados do modelo.

Todo o processo de montagem de um *transponder* foi mostrado na Figura 2, neste processo, existe a atividade “consertar”, que é uma atividade que não agrega valor ao produto e é causada principalmente por componentes com defeito, que são comprados em fornecedores. Deste modo, o nível superior do fator A propõe que seja adotado um teste de funcionamento do componente no fornecedor. Com isso, esta atividade deixaria de existir no processo de produção.

A Figura 5 mostra a porcentagem de utilização das atividades do processo de montagem, a partir da execução do modelo de simulação para o sistema real. Desta forma, a duplicação do número de equipamentos para a realização dessa atividade foi definida como o nível superior do fator B.

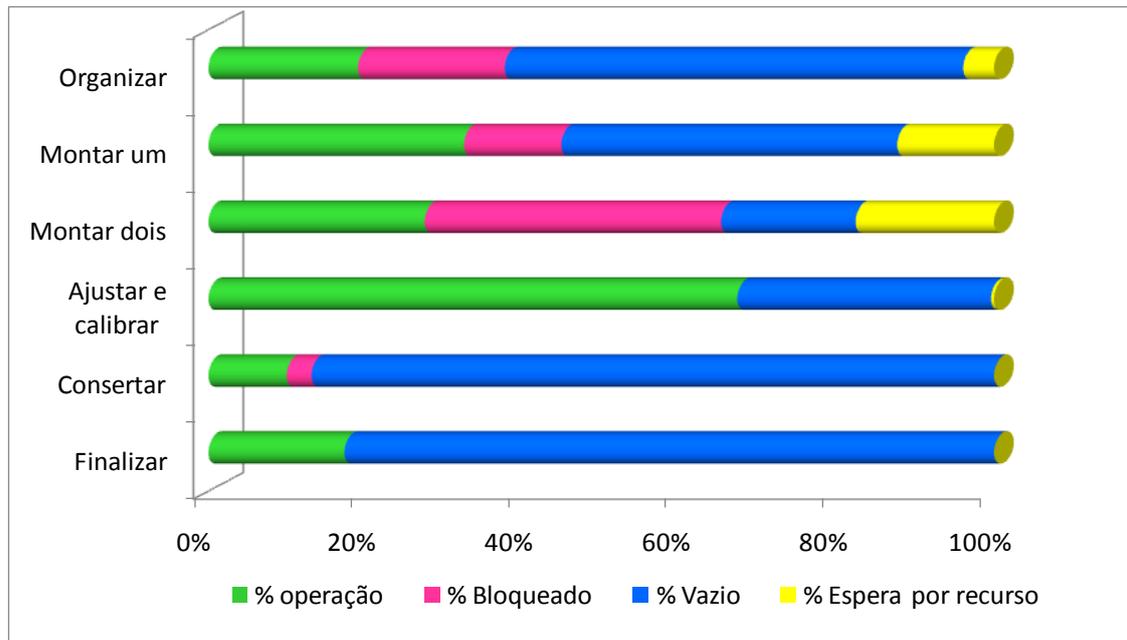


Figura 5 - Gráfico de utilização das atividades de montagem

Da mesma forma, a Figura 6 mostra a porcentagem de utilização do técnico e do estagiário, a partir da execução do modelo de simulação para o sistema real.

Analisando este gráfico, nota-se que ambos os recursos são muito utilizados. O estagiário é utilizado por volta de 90% do seu tempo disponível, enquanto o técnico fica em operação acima de 95% do tempo. Os níveis superiores dos fatores C e E representam estes cenários, respectivamente.

Já os níveis superiores dos fatores D e F representam propostas de investimentos em horas de engenharia para melhorias no projeto do produto, que podem reduzir o tempo das montagens 1 e 2, respectivamente.

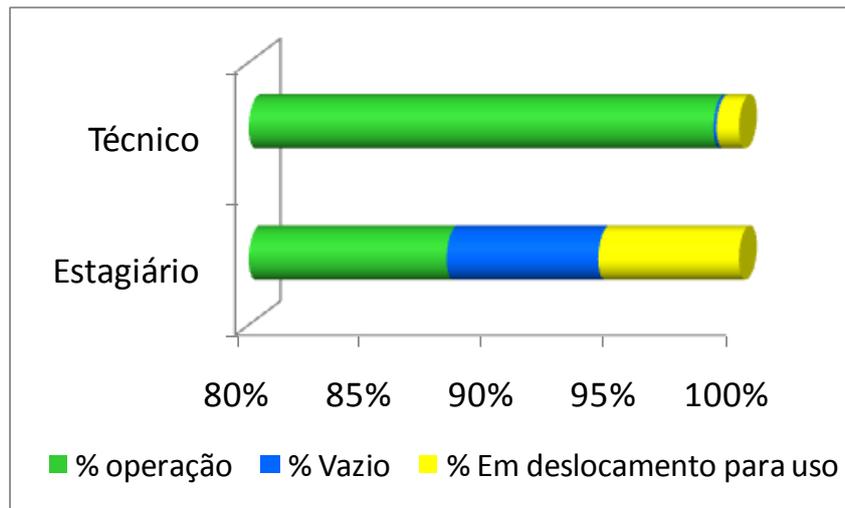


Figura 6 - Gráfico de utilização dos colaboradores da célula

Sendo assim, a matriz experimental utilizada foi do tipo 2^k , no qual k é o número de fatores. O planejamento fatorial completo foi escolhido, pois, permite a consideração do efeito de todos os fatores e das interações de todas as ordens (MONTGOMERY, 2005).

Considerando seis fatores, com dois níveis cada, tem-se um total de 64 cenários para a célula de manufatura. Considerando-se 10 replicações para cada cenário, gerou-se um total de 640 valores para a variável de resposta. A Tabela 4 apresenta a matriz experimental com os resultados obtidos via simulação. Cada linha dessa tabela apresenta os níveis dos fatores e os valores da produção mensal de *transponders* da célula simulada para as 10 replicações realizadas, em cada experimento.

Para que as conclusões retiradas com a experimentação pudessem ser utilizadas, inicialmente a validade dos resíduos teve de ser testada. Resíduo (ou erro do modelo) pode ser entendido como a diferença entre um valor observado e seu valor estimado ou ajustado no modelo estatístico (MONTGOMERY, 2005).

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 4 - Matriz experimental com dez réplicas para o total produzido por mês

Exp.	Teste	Equip.	Técnicos	Modif. Projeto	Estagiários	transceptor	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	-	-	-	-	-	-	179	190	195	183	209	201	209	196	192	188
2	+	-	-	-	-	-	219	209	204	214	220	189	212	203	191	198
3	-	+	-	-	-	-	190	192	190	208	209	187	184	209	173	191
4	+	+	-	-	-	-	219	209	204	214	220	189	212	203	191	198
5	-	-	+	-	-	-	251	245	264	261	235	252	233	235	244	250
6	+	-	+	-	-	-	260	262	251	251	263	248	249	247	255	260
7	-	+	+	-	-	-	302	302	290	295	285	298	296	283	276	284
8	+	+	+	-	-	-	320	310	298	301	323	322	300	305	321	308
9	-	-	-	+	-	-	243	270	261	259	251	282	262	268	259	270
10	+	-	-	+	-	-	276	274	290	272	247	273	253	263	252	254
11	-	+	-	+	-	-	257	268	260	249	248	274	264	251	278	275
12	+	+	-	+	-	-	276	274	290	272	247	273	253	263	252	254
13	-	-	+	+	-	-	367	371	363	364	359	364	377	365	352	362
14	+	-	+	+	-	-	376	373	377	378	400	401	404	395	377	367
15	-	+	+	+	-	-	383	382	398	398	397	403	381	371	362	379
16	+	+	+	+	-	-	397	414	404	426	419	433	407	403	387	424
17	-	-	-	-	+	-	197	184	209	191	217	190	205	192	177	191
18	+	-	-	-	+	-	217	217	214	213	207	227	224	220	214	217
19	-	+	-	-	+	-	197	201	188	196	216	195	206	189	192	193
20	+	+	-	-	+	-	217	217	214	216	208	223	216	230	218	215
21	-	-	+	-	+	-	264	260	258	249	251	272	253	266	253	250
22	+	-	+	-	+	-	266	251	256	251	258	259	284	250	263	243
23	-	+	+	-	+	-	382	387	383	407	385	400	388	362	380	403
24	+	+	+	-	+	-	424	420	396	428	428	431	425	437	423	427
25	-	-	-	+	+	-	295	269	252	257	279	295	293	284	281	260
26	+	-	-	+	+	-	289	319	316	330	322	316	307	305	304	329
27	-	+	-	+	+	-	284	269	284	285	255	287	269	278	277	278
28	+	+	-	+	+	-	289	319	316	313	315	294	316	306	303	302
29	-	-	+	+	+	-	383	421	404	405	421	420	408	383	369	375
30	+	-	+	+	+	-	431	420	416	406	414	436	409	401	432	406
31	-	+	+	+	+	-	529	546	507	522	537	525	530	520	534	516
32	+	+	+	+	+	-	555	575	573	577	555	560	570	552	571	561
33	-	-	-	-	-	+	199	192	172	194	218	200	193	183	183	205
34	+	-	-	-	-	+	187	197	221	204	223	223	214	218	213	203
35	-	+	-	-	-	+	188	188	190	203	204	197	195	199	199	215
36	+	+	-	-	-	-	187	197	221	204	223	223	214	218	213	202
37	-	-	+	-	-	+	252	254	243	240	261	271	260	254	242	249
38	+	-	+	-	-	+	276	245	250	240	253	275	246	249	253	248
39	-	+	+	-	-	+	325	318	294	307	330	327	316	322	308	297
40	+	+	+	-	-	+	322	345	330	319	345	324	330	324	330	346
41	-	-	-	+	-	+	265	278	261	263	274	284	278	260	274	271
42	+	-	-	+	-	+	297	300	303	304	306	306	303	315	281	294
43	-	+	-	+	-	+	261	281	274	274	290	277	278	276	268	249
44	+	+	-	+	-	+	297	300	321	294	313	309	293	318	278	311
45	-	-	+	+	-	+	415	395	373	389	407	396	366	358	401	360
46	+	-	+	+	-	+	407	408	414	445	418	431	415	406	395	406
47	-	+	+	+	-	+	437	442	432	433	453	442	427	433	460	433
48	+	+	+	+	-	+	463	478	462	460	452	487	473	480	481	471
49	-	-	-	-	+	+	203	194	190	188	185	194	210	198	194	207
50	+	-	-	-	+	+	228	206	226	190	206	205	216	200	211	208
51	-	+	-	-	+	+	197	186	198	198	190	201	192	203	194	195
52	+	+	-	-	+	+	228	206	226	205	215	214	215	218	202	210
53	-	-	+	-	+	+	250	273	256	273	252	246	256	254	266	249
54	+	-	+	-	+	+	258	271	253	271	268	275	270	280	270	256
55	-	+	+	-	+	+	398	403	390	393	420	409	398	384	364	387
56	+	+	+	-	+	+	434	459	423	417	417	437	425	432	428	451
57	-	-	-	+	+	+	277	267	271	272	266	267	278	270	255	246
58	+	-	-	+	+	+	296	324	332	295	301	297	311	303	320	299
59	-	+	-	+	+	+	250	273	275	286	258	280	289	252	270	260
60	+	+	-	+	+	+	311	312	319	299	328	317	302	305	318	321
61	-	-	+	+	+	+	397	433	418	409	394	413	377	361	400	387
62	+	-	+	+	+	+	439	442	439	423	415	405	421	412	451	447
63	-	+	+	+	+	+	524	566	542	542	564	566	518	578	536	551
64	+	+	+	+	+	+	634	609	612	635	603	599	608	624	617	602

De acordo com Montgomery (2005), para que um modelo seja formulado adequadamente, os resíduos devem ser normalmente distribuídos, independentes e não

devem ser correlacionados, obedecendo assim ao princípio da homocedasticidade.

A Figura 7 apresenta a verificação de normalidade dos resíduos. Por meio do gráfico de probabilidade Normal é possível julgar se os dados se ajustam a uma distribuição Normal pela visualização de como os pontos caem sob a linha. Como o valor do *p-value* do teste de normalidade (0,200) foi superior a 0,05, pode-se concluir que os dados são normalmente distribuídos.

A Figura 7 também mostra a verificação de independência dos resíduos. O gráfico dos resíduos padronizados *versus* valores observados, não apresentam nenhum padrão não aleatório, de agrupamento ou de tendência, visto que todos os *p-values* dos testes estatísticos realizados para identificação de padrões (*Clustering, Mixtures, Trend, Oscillation*) foram superiores a 0,05.

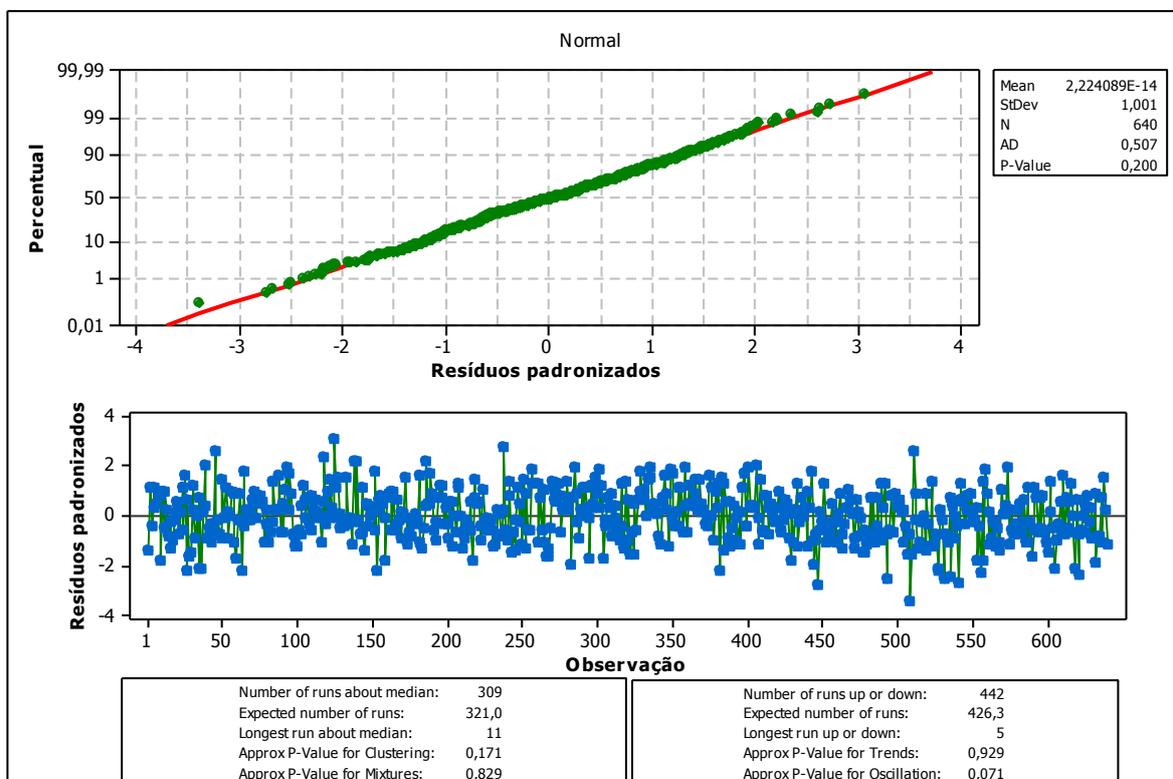


Figura 7 - Gráfico de probabilidades Normal para os resíduos padronizados

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Para checar se os resíduos são autocorrelacionados foi utilizado o teste de Durbin-Watson, com auxílio do *software Minitab®*. A estatística do teste de Durbin-Watson permite identificar a presença de autocorrelação nos resíduos, por meio do seguinte teste de hipótese (MONTGOMERY, CHERYL e MURAT, 2008):

$$H_0: \text{Não há autocorrelação} \quad (1)$$

$$H_1: \text{Há autocorrelação} \quad (2)$$

Com 640 dados (64 cenários com 10 replicações) e seis preditores (seis fatores) obtém-se os valores tabelados de d_L e d_U , utilizados para se decidir sobre a presença de autocorrelação ou não nos resíduos. Para o presente problema, o valor de $d_L = 1,85567$ e $d_U = 1,88667$. Como a estatística do teste de Durbin-Watson (1,99235) é maior que d_U , aceita-se a hipótese nula, de que os resíduos não são autocorrelacionados.

Uma vez verificada a validade dos resíduos, pode-se analisar estatisticamente os resultados do DOE. A Tabela 5 apresenta os resultados da análise de variâncias. Nota-se, que as interações de quinta e sexta ordem podem ser desconsideradas, uma vez que o valor do *p-value* acima de 0,05 mostra que essas interações não são significativas.

Tabela 5 - Análise de variâncias

<i>Fonte de variação</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>
Efeitos principais	6	6445,5	0,000
Interações de 2ª ordem	15	387,05	0,000
Interações de 3ª ordem	20	43,64	0,000
Interações de 4ª ordem	15	2,95	0,000
Interações de 5ª ordem	6	0,48	0,822
Interações de 6ª ordem	1	1,11	0,292
Erro residual	576		
Total	639		

A Figura 8 apresenta a análise dos efeitos principais de cada fator. Esta análise mostra que os fatores, “número de técnicos” e “modificação no projeto da placa”, possuem forte

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

efeito positivo sobre a resposta final, ou seja, no total de *transponders* produzidos por mês. Isso significa que a alteração do nível (-) para o nível (+) aumenta o total produzido.

A Figura 9 apresenta o peso dos 30 maiores efeitos dos fatores e suas interações no total de *transponders* produzidos por mês, por meio do gráfico de barras. Pela análise deste gráfico, todos os seis fatores possuem efeitos significativos no total produzido por mês, análise esta confirmada pelo resultado da ANOVA (Tabela 5).

Pode-se notar que o fator C (número de técnicos) é o fator que possui a maior importância relativa. Seguido pelo fator D (modificação no projeto da placa) e pelo fator B (quantidade de equipamentos).

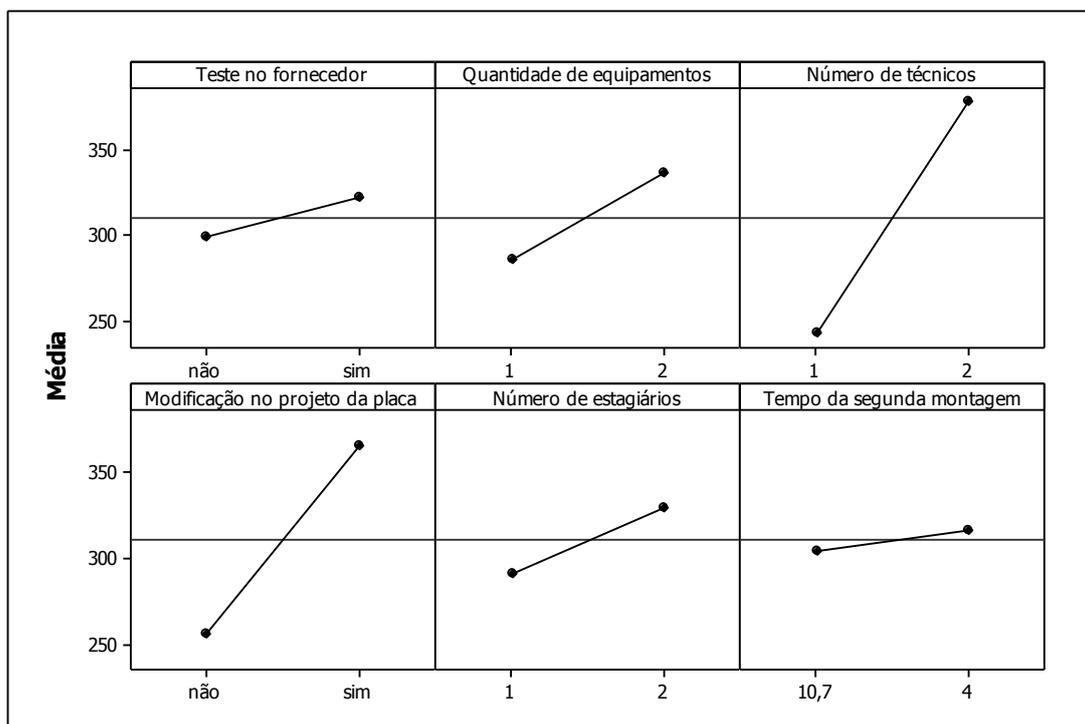


Figura 8 - Gráfico dos efeitos principais para o total produzido mensal

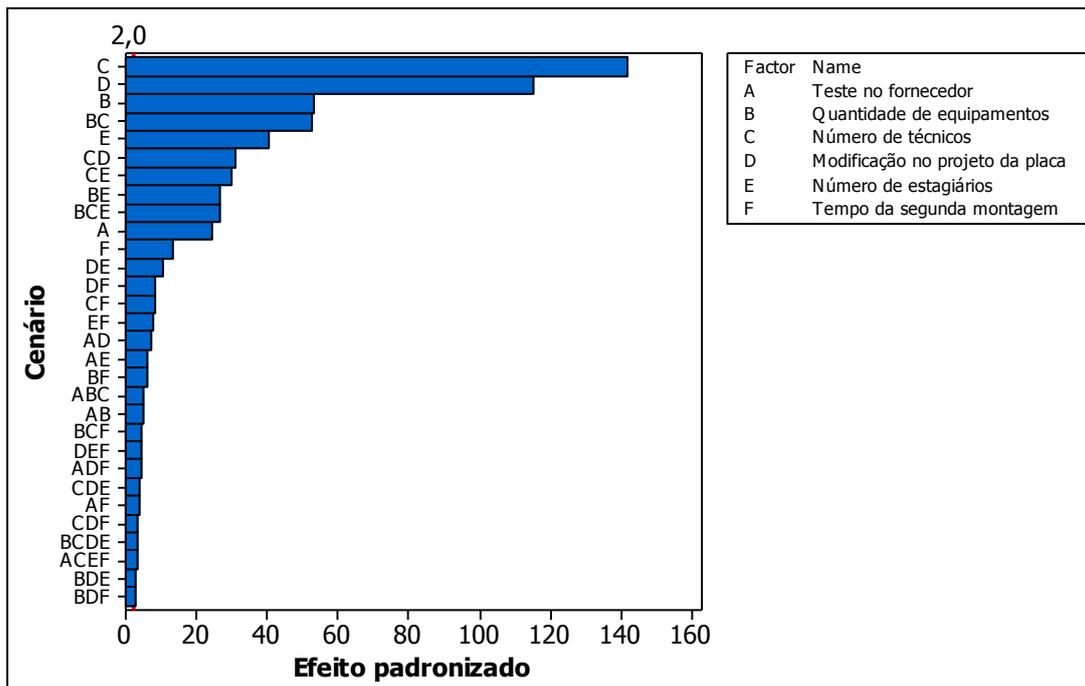


Figura 9 - Gráfico de barras dos efeitos padronizados para os 30 maiores efeitos

A análise de variâncias, Tabela 5, também mostra a presença de interações significativas entre estes fatores. Como por exemplo, a interação BC possui a quarta maior importância relativa. O que significa, que a contratação de mais um técnico e a compra de mais um conjunto de equipamentos aumenta o total produzido por mês.

Enquanto que as interações: CD (número de técnicos e modificação no projeto da placa), CE (número de técnicos e número de estagiários), BE (quantidade de equipamentos e número de estagiários) e BCE (quantidade de equipamentos, número de técnicos e número de estagiários), possuem respectivamente a 6^a, 7^a, 8^a e 9^a importância relativa.

O gráfico da Figura 10 ilustra as interações de segunda ordem entre os fatores. Entretanto, de acordo com Montgomery (2005), este gráfico é útil, apenas, para ajudar na interpretação das interações, eles não devem ser utilizados como a única técnica de análise de dados, porque sua interpretação é subjetiva. A análise de variâncias deve ser utilizada para comprovar a significância de cada interação pela análise do *p-value*.

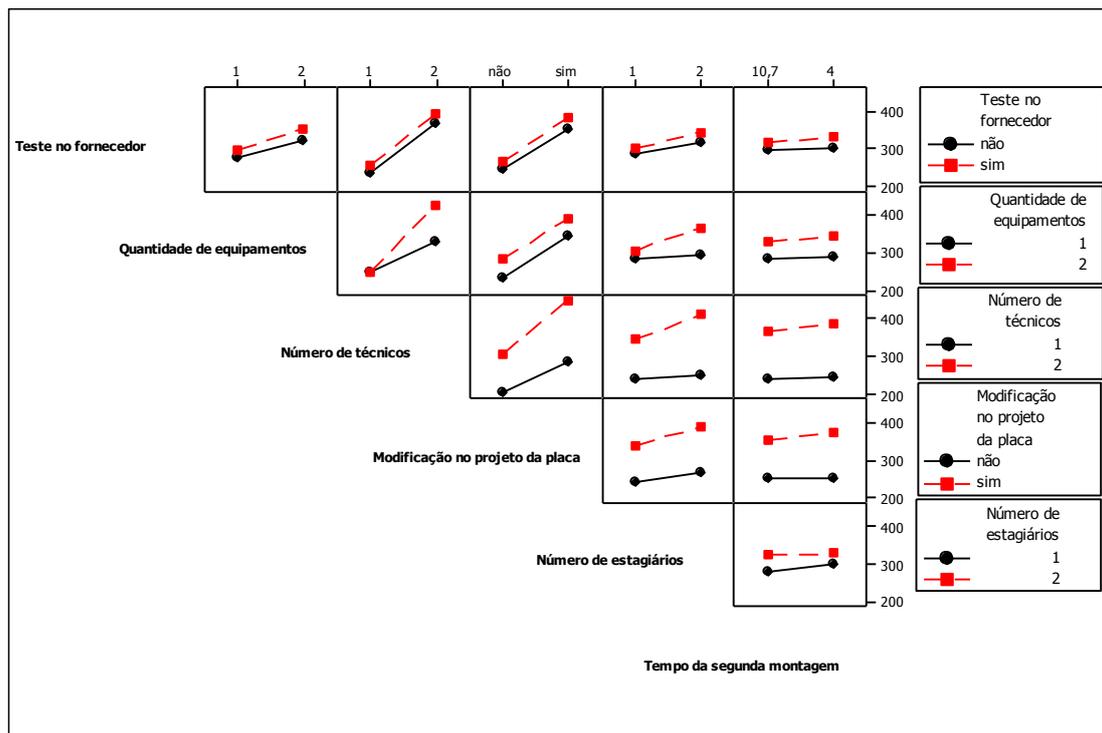


Figura 10 - Gráfico das interações de segunda ordem entre os fatores

Embora a análise de variâncias, Tabela 5, tenha apresentado as interações de quarta ordem como estatisticamente significativas, neste artigo estas interações não são analisadas por apresentarem pouca relevância prática. Neste caso, para justificar todos esses investimentos, apontados pela análise do planejamento de experimentos, uma análise de viabilidade econômica seria adequada.

5. Conclusões

Este trabalho mostrou a aplicação de uma sequência lógica de passos para a construção e experimentação de um modelo de simulação, para uma célula de produção de uma empresa de alta tecnologia. Como implicações práticas, este trabalho orienta os especialistas do processo a focarem os recursos da empresa nas variáveis relevantes para aumentar a produção, evitando o processo de tentativa e erro ao utilizar a combinação das técnicas: simulação e planejamento de experimentos.

Para a empresa, este trabalho contribuiu principalmente para a identificação da

influência significativa dos fatores mais importantes e de interações, como BC, CD, CE, BCE e DE no total produzido por mês. Este tipo de informação é uma característica da execução e análise de um planejamento fatorial completo, dificilmente estes resultados seriam alcançados sem uma técnica adequada como esta.

Sem a flexibilidade de um modelo de simulação, a execução destes 64 cenários seria impraticável, uma vez que a célula de produção não pode ser paralisada, e envolveria a compra de equipamentos e contratação de funcionários sem uma previsão confiável de qual seria o resultado.

O modelo de simulação também contribuiu com a identificação da utilização das atividades do processo de montagem e dos colaboradores. Ainda na etapa de construção do modelo conceitual, já foi possível a identificação da atividade “consertar”, que é uma atividade que não agrega valor ao produto. A análise do modelo indicou que esta atividade poderia ser eliminada do processo de montagem, se os componentes fossem testados nos fornecedores. Esta possibilidade foi testada como um fator no planejamento de experimentos. Após os resultados do planejamento de experimentos, a empresa definiu ações para testar os componentes diretamente nos fornecedores.

Entretanto, para fins gerenciais, torna-se importante analisar a viabilidade de se investir capital para a execução de um cenário significativo, bem como analisar qual cenário é mais atrativo para a empresa do ponto de vista econômico. Deste modo, trabalhos futuros podem ser conduzidos com o objetivo de avaliar se a receita gerada pelo incremento no total produzido, causado pela mudança do nível (-) para (+), é maior do que os investimentos e gastos necessários para isto.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG, CNPq, Programa de Pró-Engenharia da CAPES, a empresa Padtec e aos revisores deste trabalho, que contribuíram para seu aprimoramento.

Referências

- Abdulmalek, F. A. & Rajgopal, J. (2007). Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. *International Journal of Production Economics*, 107, 223-236.
- Anderson, T. W. & Darling, D.A. (1954). A Test of Goodness-of-Fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49, 765-769.
- Ankenman, B.; Nelson, B. L. & Staum, J. (2010). Stochastic Kriging for Simulation Metamodeling. *Operations Research*, 58, 371-382.
- Balci, O. (2003). Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* New Orleans, LA, USA.
- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons, New York.
- Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L. & Nicol, D. M. (2005). *Discrete event system simulation*. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Bertrand, J. W. M. & Fransoo, J. C. (2002). Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, 2, 241-264.
- Brown, M. B. & Forsythe, A. B. (1974). Robust Tests for the Equality of Variances. *Journal of the American Statistical Association*, 69, 364-367.
- Cabrera-Rios, M.; Mount-Campbell, C. A. & Irani, S. A. (2002). An approach to the design of a manufacturing cell under economic considerations. *International Journal of Production Economics*, 78, 223-237.
- Chung, C. A. (2004). *Simulation Modeling Handbook: a practical approach*. CRC Press, Washington.
- Chwif, L. & Medina, A. C. (2010). *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações*. 3.ed. Editora dos autores, São Paulo.
- Chwif, L.; Paul, R. J. & Barretto, M. R. P. (2006). Discrete event simulation model reduction: A causal approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14, 930-944.
- Garza-Reyes, J. A.; Eldridge, S.; Barber, K. D. & Soriano-Meier, H. (2010). Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures: a relationship analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27, 48-62.
- Greasley, A. (2006) Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organization. *Technovation*, 26, 95-103.
- Harrel, C.; Ghosh, B. K. & Bowden, R. O. (2004). *Simulation Using Promodel*. 2.ed. McGraw-Hill, New York.
- Kelton, W. D. (2003). Designing simulation experiments. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* New Orleans, LA, USA.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

- Kleijnen, J. P. C. (1995). Theory and Methodology: Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82, 145-162.
- Kleijnen, J. P. C.; Sanchez, S. M.; Lucas, T. W. & Cioppa, T. M. (2005). State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. *Journal on Computing*, 17, 263-289.
- Law, A. M. (2009). How to build valid and credible simulation models. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* Austin, TX, USA.
- Leal, F.; Almeida, D. A. & Montevechi, J. A. B. (2008). Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação por meio de elementos do IDEF. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Anais...* João Pessoa, PB.
- Leal, F.; Costa, R. F. S.; Montevechi, J. A. B.; Almeida, D. A. & Marins, F. A. S. (2011). A practical guide for operational validation of discrete simulation models. *Pesquisa Operacional*, 31, 57-77.
- Martins, R. A. (2010). Abordagens quantitativa e qualitativa. In: *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações* [editado por Miguel, P. A. C.] Elsevier, Rio de Janeiro, 45-61.
- Montevechi, J. A. B.; Leal, F.; Pinho, A. F.; Costa, R. F. S.; Oliveira, M. L. M. & Silva, A. L. F. (2010). Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. *Proceedings...* Baltimore, MD, USA.
- Montevechi, J. A. B.; Pinho, A. F.; Leal, F. & Marins, F. A. S. (2007). Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* Washington, DC, USA.
- Montgomery, D.C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. 6.ed. John Wiley & Sons, New York.
- Montgomery, D. C.; Cheryl, L. J. & Murat K. (2008). *Introduction to time series analysis and forecasting*. Wiley, New Jersey.
- Ryan, J. & Heavey, C. (2006). Process modeling for simulation. *Computers in Industry*, 57, 437-450.
- Sanchez, S. M. (2007). Work smarter, not harder: guidelines for designing simulation experiments. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* Washington, DC, USA.
- Sargent, R. G. (2011). Verification and validation of simulation models. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* Phoenix, AZ, USA.
- Triola, M. F. (2005). *Introdução a Estatística*. 9ª. Ed. LTC, Rio de Janeiro.