

APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS E ARRANJO ORTOGONAL DE TAGUCHI NA OTIMIZAÇÃO DE UMA CÉLULA DE MANUFATURA

Ubirajara Rodrigues

Universidade Federal de Itajubá
Caixa Postal 50, CEP 37500-903, Itajubá, MG
bira.rodr@gmail.com

José Arnaldo Barra Montevechi

Universidade Federal de Itajubá
Caixa Postal 50, CEP 37500-903, Itajubá, MG
montevechi@unifei.edu.br

Rafael de Carvalho Miranda

Universidade Federal de Itajubá
Caixa Postal 50, CEP 37500-903, Itajubá, MG
mirandaprod@yahoo.com.br

Luiz Fernando Pereira

Universidade Federal de Itajubá
Caixa Postal 50, CEP 37500-903, Itajubá, MG
engelutz@yahoo.com.br

RESUMO

O presente trabalho aborda a aplicação da simulação a eventos discretos e arranjo ortogonal de Taguchi como ferramentas no auxílio ao processo de tomada de decisão em uma célula de manufatura de uma empresa do setor bélico. O objetivo é verificar a melhor configuração da linha para diminuir o tempo de processamento por peça. Os resultados desta pesquisa quantitativa foram obtidos via simulação computacional, classificando-se como uma pesquisa empírica descritiva por criar um modelo que descreve de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, levando a uma compreensão dos processos reais. Nos resultados apurados foi possível identificar as operações significativas para o processo e a melhor configuração para atingir o objetivo proposto pela construção de cenários através do arranjo de Taguchi. O principal resultado foi a proposta de reconfiguração da linha de produção, que pode reduzir em até 87,6% o tempo de processamento por peça.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação a eventos discretos. Arranjo de Taguchi. Otimização.

Área principal: SIM - Simulação

ABSTRACT

This study investigates the application of discrete-event simulation (DES) and orthogonal Taguchi design to aid in decision-making processes within a manufacturing cell from the arms industry. The research objective consisted of verifying the best configuration in order to minimize part processing time. Quantitative results were obtained via computational simulation, thus classifying the research as empirical and descriptive due to its ability to describe the cause-and-effect relationships which exist within the manufacturing cell. Researchers were able to identify the significant operations for the process as well as the best configuration of variables through the use of the Taguchi design. The central real-world result of this proposal was the reconfiguration of the production line, which has led to a dramatic 87.6% reduction in part processing time.

KEY WORDS: Discrete-event simulation. Taguchi design. Optimization.

Main Area: SIM – Simulation

1. Introdução

A elevada competitividade do mercado atual tem exigido das empresas agilidade e flexibilidade para constantes mudanças. Dessa forma, o emprego da simulação a eventos discretos permite a análise de cenários sem alterar o sistema real, possibilitando o estudo e a redução dos problemas ao implementar possíveis alternativas para um determinado sistema. Nesse sentido, a simulação tem sido cada vez mais utilizada para apoiar processos de tomada de decisão. Com seu uso torna-se possível testar soluções encontradas em um modelo computacional de maneira econômica, rápida e sem o uso da tentativa e erro no sistema real (BANKS *et al.*, 2005; GARZA-REYES *et al.*, 2010; SARGENT, 2009).

A simulação representa a realidade através de um modelo abstrato, permitindo a realização de estudos em condições controladas, possibilitando a execução de experimentos, que seriam inviáveis ou extremamente onerosos no mundo real. Segundo Law e Maccomas (1998), a simulação tornou-se uma ferramenta valiosa na análise de sistemas de manufatura complexos (SHANNON, 1998; O'KANE *et al.*, 2000; BANKS *et al.*, 2005).

Para O'Kane *et al.* (2000), a simulação a eventos discretos permite prever o comportamento de sistemas. Segundo este autor, o método consiste em modelar um sistema onde mudanças ocorrem em intervalos discretos de tempo, tornando-se uma técnica bastante apropriada para sistemas que se comportam dessa forma, como por exemplo, os sistemas de manufatura.

Para o presente trabalho foi selecionado o processo de fabricação de uma peça produzida por uma indústria de material de defesa, que visa tanto o mercado nacional como o internacional. A escolha deste processo reveste-se de importância devido à peça ser fundamental para funcionamento e segurança do usuário do produto. O processo de fabricação da peça encontra-se em plena utilização, mas devido à diversidade de modelos dos produtos fabricados e atualização dos equipamentos, identificou-se a necessidade de se analisar as operações atualmente realizadas, para levantar possíveis sugestões de aperfeiçoamento para o processo.

Dessa forma, este trabalho busca desenvolver um projeto de simulação para avaliar o desempenho desse sistema de manufatura, verificando as possibilidades para otimizar as operações do objeto de estudo, particularmente quanto ao tempo de ciclo das peças produzidas. Sendo assim, se propõe o emprego da simulação a eventos discretos em conjunto com arranjo ortogonal de Taguchi para otimizar o processo de fabricação, minimizando o tempo de ciclo de produção das peças.

O artigo encontra-se dividido do seguinte modo: a seção 2 apresenta a metodologia e a classificação da pesquisa; a seção 3 traz o referencial teórico; a seção 4 apresenta o objeto de estudo e o desenvolvimento do projeto de simulação; a seção 5 apresenta e discute os resultados alcançados e, por fim, a seção 6 traz as considerações finais.

2. Classificação da pesquisa e metodologia para projeto de simulação a eventos discretos

A metodologia de pesquisa aqui explorada é a pesquisa quantitativa, com foco em sistemas de manufatura. Os resultados desta pesquisa serão obtidos via simulação, caracterizando o método de pesquisa como modelagem e simulação (MORABITO e PUREZA, 2010). A dificuldade de realizar o experimento em situação real justifica o emprego deste método, pela possibilidade de manipulação dos parâmetros críticos para conhecer as combinações que atingem os melhores resultados.

Dessa forma, segundo a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), pode-se classificar essa pesquisa como empírica descritiva, uma vez que cria um modelo computacional que descreve de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, levando a uma compreensão maior dos processos reais.

Especificamente para este trabalho, foi utilizado o método proposto por Montevechi *et al.* (2010) para a condução do projeto de simulação. Neste método os autores construíram um fluxograma para representar a lógica de um projeto de simulação, que usa o planejamento e análise de experimentos para conduzir a fase de análise dos resultados do modelo. A Figura 1 apresenta a sequência de passos do método.

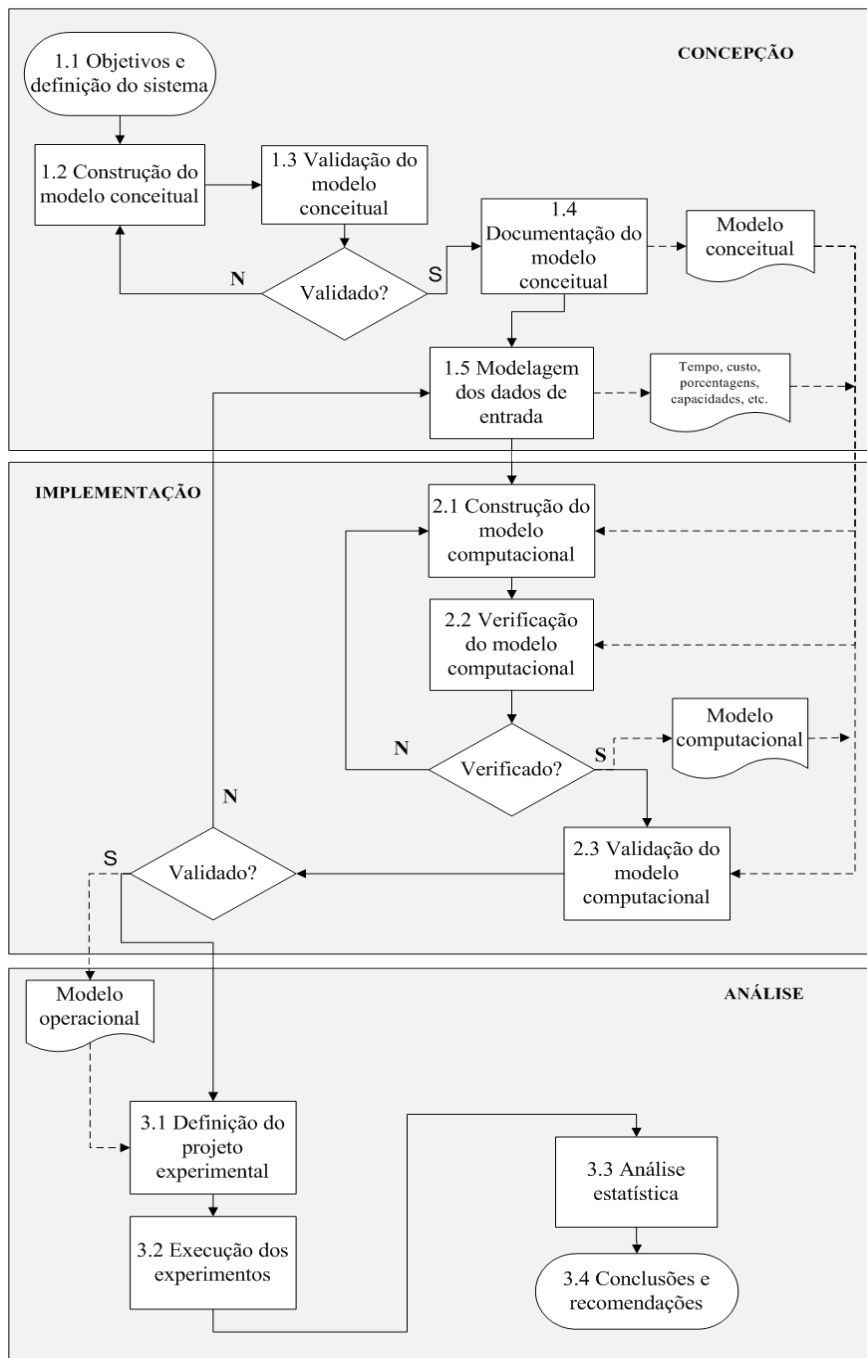


Figura 1 - Etapas de um projeto de simulação
Fonte: Montevechi *et al.* (2010)

A fase de concepção marca o início do projeto, e é um período de definições e descobertas para a equipe envolvida (BANKS *et al.*, 2005). Nesta fase, o analista de simulação e os especialistas do processo definem de forma clara 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 o sistema existente, facilitando a construção do modelo computacional. O modelo conceitual é uma descrição do modelo que se deseja construir. Este tem por objetivo orientar a etapa de reunião de dados, identificando os pontos de coleta, além de agilizar o processo de elaboração do modelo computacional (BROOKS e ROBINSON, 2001).

Ao final da elaboração do modelo, o mesmo necessita ser validado. Como última etapa

da fase de concepção, tem-se a modelagem dos dados de entrada. Chwif e Medina (2010) destacam a importância dessa etapa, uma vez que os dados coletados no sistema real irão alimentar o modelo computacional.

A fase de implementação se inicia com a construção do modelo computacional. Para Chwif e Medina (2010), o modelo computacional é obtido através da conversão do modelo conceitual, utilizando-se para tal, alguma linguagem de simulação ou um simulador comercial. Uma vez construído o modelo computacional, esse deve passar por duas etapas de extrema importância: a verificação e a validação. Segundo Sargent (2009), a verificação consiste em se comprovar que o modelo conceitual foi corretamente traduzido em um modelo computacional e se este está construído de forma correta. Law (2009) e Harrel *et al.* (2002) afirmam que a validação é o processo responsável em determinar se um modelo simulado representa um sistema real, para os objetivos específicos do estudo. Para Sargent (2009), a validação e a verificação de modelos de simulação são etapas críticas no desenvolvimento desses modelos.

Segundo Chwif e Medina (2010), na última fase do método, Análise, o modelo computacional está preparado para a execução de experimentos e otimização, dando origem ao modelo experimental ou modelo operacional. Nesta fase ocorrem a definição do projeto experimental, a realização de experimentos e a análise dos dados obtidos.

3. Planejamento e análise de experimentos simulados

Para Montgomery (2005), o planejamento e análise de experimentos (DOE) pode ser definido como o processo de planejamento de experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Sendo que qualquer problema experimental, segundo Gomes (2010) e Costa (2010), deve ser sustentado por dois elementos: o projeto de experimentos e a análise estatística dos dados.

Para Gomes (2010), as técnicas do DOE têm encontrado uma ampla aplicação nas mais variadas áreas do conhecimento, mostrando-se como um conjunto de ferramentas de grande importância para o desenvolvimento de produtos e processos.

Segundo Kelton (2003), apesar dos métodos de planejamento de experimentos terem sido desenvolvidos visando experimentos físicos, eles podem ser facilmente utilizados em experimentos simulados, apresentando inúmeras oportunidades para melhorias que são difíceis ou impossíveis de serem implementadas em experimentos físicos. De acordo com Kleijnen *et al.* (2005), os praticantes de simulação podem conseguir mais de suas análises pelo uso do DOE, para explorar modelos computacionais.

A fim de evitar a técnica da tentativa e erro para a busca de soluções, Montevechi *et al.* (2007) indica o emprego do projeto de experimentos como uma das possibilidades da melhoria do desempenho no processo de simulação.

Segundo Kelton (2003), para facilitar o entendimento do papel da simulação na execução de experimentos, é necessário imaginar que, em um experimento, a variável de resposta (Y) ou a variável dependente pode ser representada como função das variáveis de entrada, fatores ou variáveis independentes, podendo ser representada como (Eq. 1):

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad 1$$

Onde:

- x_1, x_2, x_n representam as variáveis de entrada, fatores ou variáveis independentes;
- f representa a função de transformação que é o próprio modelo de simulação.

Segundo Leal *et al.* (2008), em modelos de simulação, os níveis escolhidos para cada fator devem permitir que seus efeitos sejam programados no modelo. Em um modelo de simulação, o modelador deve conhecer, *a priori*, qual variável será afetada com a mudança dos níveis.

A experimentação através da simulação apresenta algumas vantagens peculiares sobre os experimentos físicos, industriais ou de laboratórios (LAW e KELTON, 2000): com a

simulação é possível controlar fatores que na realidade são incontroláveis; e, é possível controlar a origem básica de variação, diferente da situação em experimentos físicos.

Com relação aos projetos experimentais, as técnicas mais utilizadas compreendem o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta (GOMES, 2010).

Dessa forma, neste trabalho optou-se pelo emprego dos arranjos ortogonais de Taguchi devido a este planejamento permitir a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número reduzido de experimentos. Este método pode ser aplicado em processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de seu comportamento, em processos com alta dispersão, ou em que as replicações demandem alto custo ou tempo (GOMES, 2010).

4. Objeto de estudo

O sistema a ser simulado representa uma célula de manufatura responsável pela fabricação de uma peça produzida por uma indústria do setor de defesa. Inicialmente a entidade barra chega ao sistema e é encaminhada para a sequência de operações de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição das operações

<i>Operação</i>	<i>Descrição</i>
12	Corte da entidade barra em 10 novas peças
14	Retirada do excesso de material de cada peça individualmente
20	Retífica das duas faces da peça
22	Retirada do excesso de material de cada peça individualmente
32	Realização de furos guia para as operações seguintes
40	Operação de fresamento
50	Realização de furos na peça
88	Realização de desbaste na peça
114	Fresamento do delta vazado que caracteriza a peça
120	Retífica nas duas faces da peça
130	Identificação da peça, mês e ano de fabricação em duas etapas
140	Fresamento do rasgo interno da peça
150	Similar às outras operações de fresamento
152	Similar às outras operações de fresamento
160	Operação para alargar e limpar os furos efetuados
170	Similar às outras operações de fresamento
172	Retirada do excesso de material de cada peça individualmente
180	Os lotes são examinados e as peças aprovadas são encaminhadas para tratamento térmico

Foram realizadas visitas e acompanhamentos nas instalações da fábrica. Dados foram coletados sobre as operações, sistemática de trabalho, turnos, operadores, entre outras informações. Em especial, foram coletadas as informações sobre: demanda do produto; turnos de trabalho; e tempos de execução para cada operação do processo (cronometragem).

Inicialmente, um modelo conceitual do sistema produtivo foi construído para o processo através da técnica IDEF-SIM (LEAL *et al.*, 2008) (Figura 2). A validação do modelo conceitual foi feita através da validação presencial, prevista por Sargent (2009), ou seja, validar o modelo conceitual através do questionamento para especialistas e integrantes da equipe de processo.

Para que os dados coletados pudessem ser utilizados na construção do modelo de simulação, houve necessidade de uma análise mais aprofundada, utilizando técnicas estatísticas. Para Chwif e Medina (2010), esta etapa de modelagem dos dados de entrada pode ser dividida em três passos: coleta de dados, tratamento dos dados e inferência.

Após a cronometragem dos tempos, uma análise estatística foi realizada com esses dados, utilizando o *software Minitab®*, caracterizando a etapa de tratamento dos dados. Primeiramente, diagramas de caixas (*box plots*) foram construídos a fim de se identificar valores

não usuais (*outliers*) na amostra. Quando esses existiram, cada ocorrência era analisada separadamente. Nos casos em que foi identificada uma causa especial para a medida apresentar um valor não usual para a atividade, os valores eram eliminados.

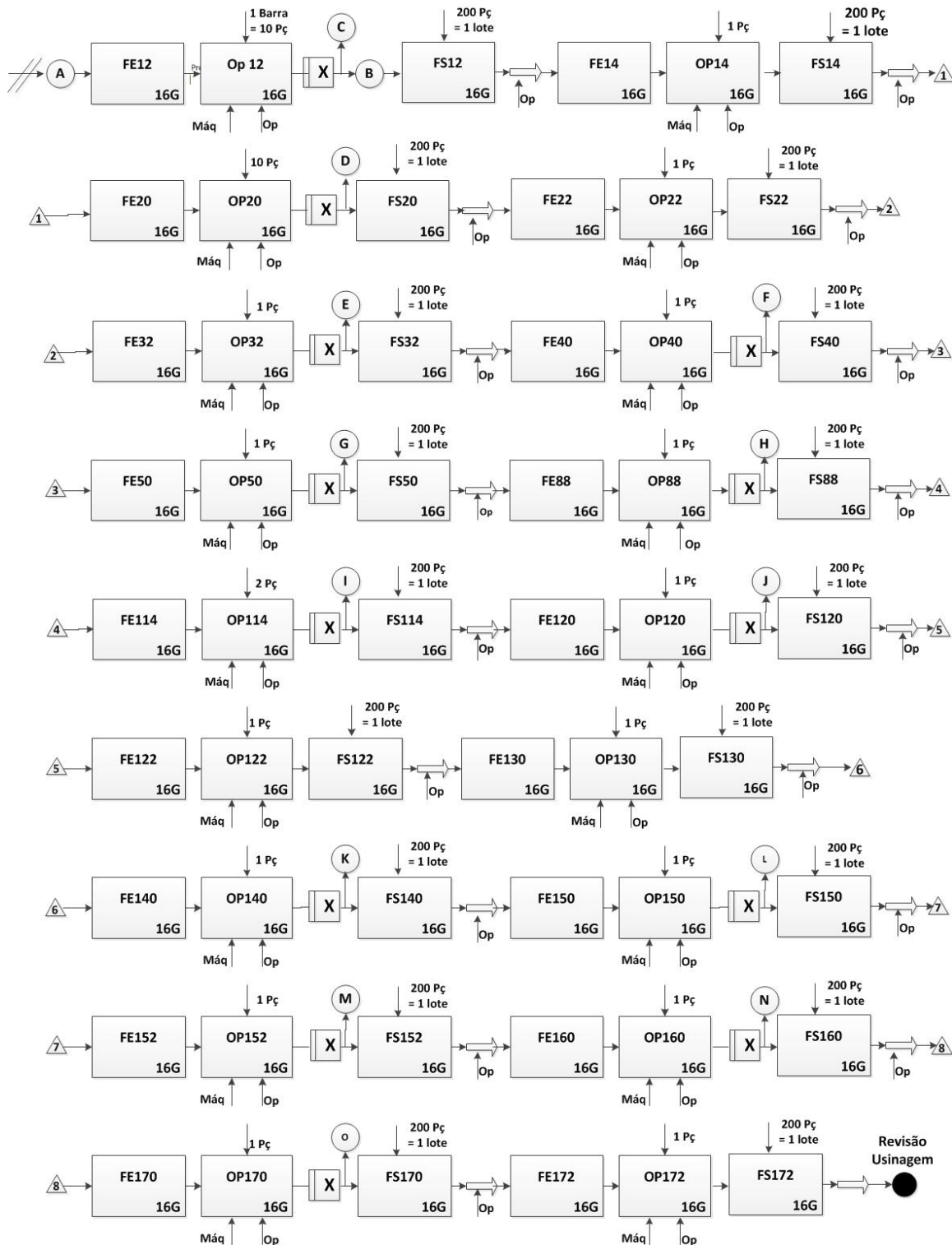


Figura 2 - Representação do modelo conceitual (IDEF-SIM)

Em seguida, um teste de aderência à distribuição de probabilidades normal (*Anderson-Darling Normality Test*) foi realizado para cada amostra referente às operações de manufatura da peça. Terminada a etapa de concepção, passou-se para a etapa de implementação, com a construção do modelo computacional.

O simulador escolhido para esta etapa foi o *Promodel*®. Com a finalidade de visualizar de modo geral os processos e produtos da célula de manufatura, a Figura 3 apresenta a disposição física do fluxo produtivo no leiaute da célula.

No processo de verificação e validação do modelo computacional (Figura 3), treze versões foram construídas. Nesta etapa foram utilizados recursos do simulador que auxiliaram a verificação do modelo, como o uso da função *trace*, que exhibe passo a passo a execução da animação da simulação, com o objetivo de verificar se a lógica do modelo está correta. Também foi utilizado, o uso de contadores nas *locations* (postos físicos do sistema onde se realizam os processos), para verificar se a capacidade das *locations* atende ao modelo. Para a verificação da animação, o modelo foi executado passo a passo para constatar se a programação do modelo realizada atendia as atividades e operações executadas na realidade.

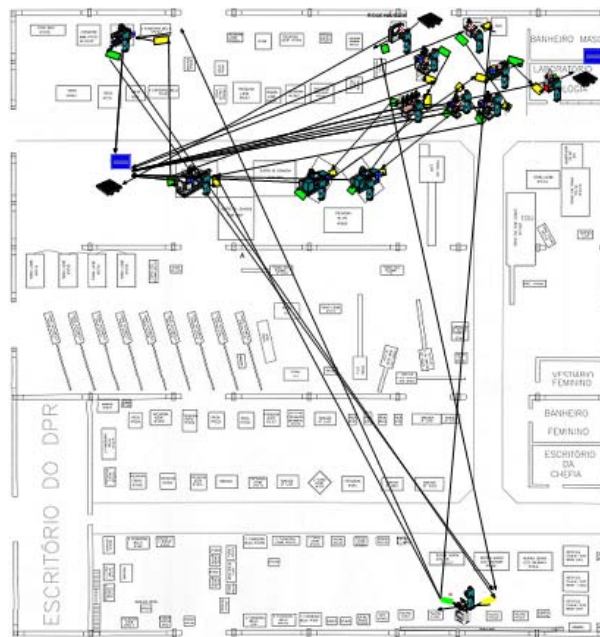


Figura 3 – Modelo computacional

Após a confirmação, foi realizada a validação do modelo computacional com base em comparações com dados históricos do processo em 2010. A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados utilizados para validação. Dessa forma compararam-se dados históricos das peças produzidas e descartadas durante um ano, com os valores obtidos com réplicas referentes a um ano do modelo computacional. Dessa forma, com base na análise do modelo e da verificação com os especialistas do processo, o modelo computacional foi validado.

Tabela 2 – Dados históricos e simulados

Peça	Real	Simulado
Produzida	6953	6765
Descartada	202	234

Com o modelo computacional verificado e validado, pode-se passar para a última etapa do método utilizado: a etapa de análise. Para iniciar a otimização do processo, o modelo computacional foi simulado por um ano com a realização de cinco replicações. A partir da realização desta simulação, foi construído um gráfico (Figura 4), que mostra a porcentagem de utilização das *locations* do processo de fabricação da peça.

Foram selecionadas como significativas às operações da célula de manufatura da peça que restringem o fluxo de peças na célula. Pela análise do gráfico, as atividades que restringem o fluxo de produção são as operações 12, 32, 40, 88, 114, 120, 150, 152, 170 (acima de 50% de utilização). Estas atividades bloqueiam as operações que as precedem, e geram ociosidade nas operações que as sucedem. As operações 88 e 152 apesar de apresentarem uma utilização média

abaixo dos 50%, em algumas das replicações efetuadas atingiram valores superiores a este valor, sendo, por isso, relacionadas para comporem o experimento.

Empregou-se o DOE por ser uma ferramenta adequada para conduzir a experimentação no modelo de simulação, pois evita transtornos no sistema real e a realização de investimentos inviáveis, comuns em processos de tentativa e erro. O experimento foi planejado utilizando arranjo ortogonal de Taguchi L32, relacionando nove fatores a dois níveis, correspondentes às operações que restringem o fluxo de peças na célula citados anteriormente. Os níveis dos fatores foram estabelecidos junto aos especialistas do processo e as possibilidades da empresa. Na Tabela 3, os fatores e seus níveis são apresentados.

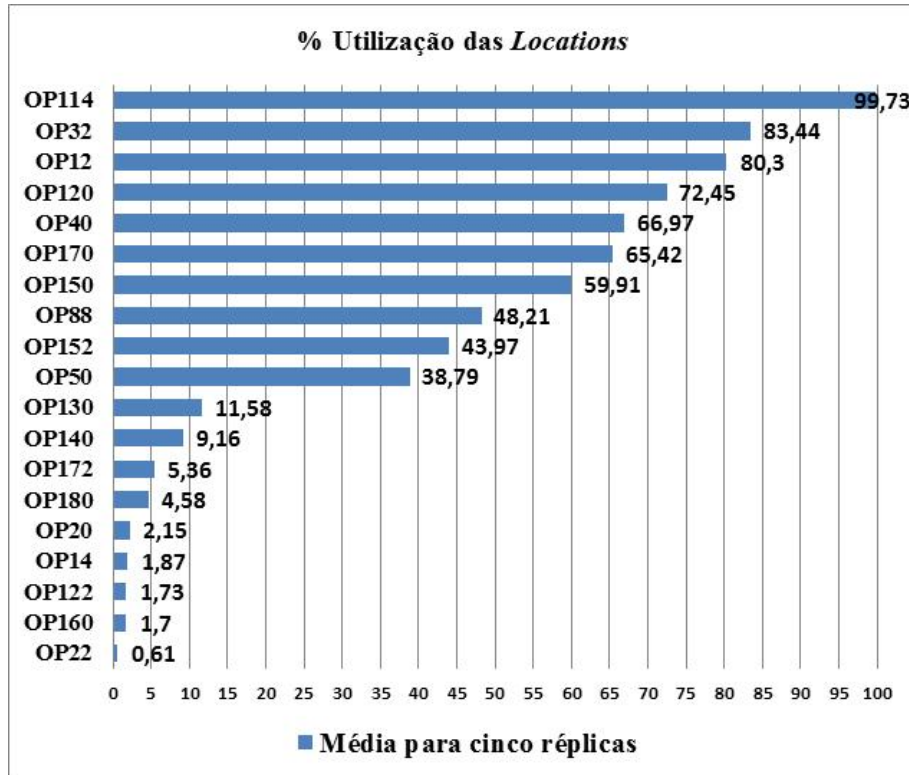


Figura 4 - Porcentagem de utilização das *locotions*

Tabela 3 - Fatores e níveis das operações da peça

Fator	Descrição	Nível inferior	Nível superior
A	OP 12	1 peça	2 peças
B	OP 32	1 peça	2 peças
C	OP 40	1 máquina	2 máquinas
D	OP 88	1 máquina	2 máquinas
E	OP 114	1 peça	2 peças
F	OP 120	1 máquina	2 máquinas
G	OP 150	1 máquina	2 máquinas
H	OP 152	1 máquina	2 máquinas
J	OP 170	1 máquina	2 máquinas

De acordo com o arranjo utilizado, foram atribuídas ainda 18 (dezoito) interações: AB, AC, AD, AE, AF, AH, BC, BD, BE, BF, BJ, CD, CE, CF, DE, DF, EF, FG. A matriz experimental utilizada foi o arranjo ortogonal L32 com cinco réplicas. Selecionou-se como variável de resposta o tempo de processamento por peça, tendo como parâmetro “quanto menor melhor”. A Tabela 4 apresenta a matriz experimental com a média dos resultados obtidos através do modelo de simulação, bem como os valores da razão sinal ruído. O arranjo de Taguchi foi selecionado, pois, permite a consideração do efeito de todos os fatores principais e das interações

de segunda ordem relevantes para este estudo, executando-se um número reduzido de experimentos.

Considerando nove fatores principais, com dois níveis cada, tem-se um total de 32 cenários para a célula de manufatura. Considerando-se cinco replicações para cada cenário, gerou-se um total de 160 amostras para a variável de resposta. A utilização da simulação para realizar os experimentos evitou a paralização da célula de produção e a ocorrência de gastos provenientes da experimentação direta na célula.

5. Análise dos resultados

Da análise dos tempos médios obtidos com a execução dos experimentos, verifica-se que os cenários que melhor atendem ao objetivo almejado são os cenários 1, 8, 26 e 31 (destacados na Tabela 4), que apresentaram uma redução significativa do tempo de processamento por peça na célula de manufatura analisada.

Tabela 4 - Arranjo Ortogonal L32 - valores médios dos efeitos e da razão SR por cenário

Cenário	P12	P32	P40	P88	P114	P120	P150	P152	P170	Média	SR	Cenário	P12	P32	P40	P88	P114	P120	P150	P152	P170	Média	SR
C1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	68,9	-36,76	C17	2	2	2	1	1	2	1	1	2	1084,6	-60,71
C2	1	2	2	2	1	2	1	1	1	766,78	-57,69	C18	2	1	1	2	1	1	1	1	2	377,92	-51,55
C3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	767,32	-57,70	C19	2	1	1	2	2	1	2	2	1	877,36	-58,86
C4	1	1	1	1	2	1	2	2	2	559,31	-54,95	C20	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1084,4	-60,70
C5	1	1	1	2	2	2	2	1	1	559,7	-54,96	C21	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1083,75	-60,70
C6	1	2	2	1	2	1	2	1	1	767,73	-57,70	C22	2	1	1	1	2	2	2	1	2	877,39	-58,86
C7	1	2	2	1	1	1	1	2	2	767,41	-57,70	C23	2	1	1	1	1	2	1	2	1	379,05	-51,57
C8	1	1	1	2	1	2	1	2	2	69,39	-36,83	C24	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1084,45	-60,70
C9	2	1	2	1	1	1	2	2	2	378,14	-51,55	C25	1	2	1	1	1	2	2	2	1	767,47	-57,70
C10	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1083,97	-60,70	C26	1	1	2	2	1	1	2	2	1	69,13	-36,79
C11	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1084,46	-60,70	C27	1	1	2	2	2	1	1	1	2	561,11	-54,98
C12	2	1	2	1	2	1	1	1	1	877,71	-58,87	C28	1	2	1	1	2	2	1	1	2	767,09	-57,70
C13	2	1	2	2	2	2	1	2	2	878,21	-58,87	C29	1	2	1	2	2	1	1	2	1	767,28	-57,70
C14	2	2	1	1	2	1	1	2	2	1085,72	-60,71	C30	1	1	2	1	2	2	1	2	1	559,26	-54,95
C15	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1084,38	-60,70	C31	1	1	2	1	1	2	2	1	2	68,75	-36,75
C16	2	1	2	2	1	2	2	1	1	377,87	-51,55	C32	1	2	1	2	1	1	2	1	2	767,13	-57,70

Na análise estatística dos dados realizou-se a análise de variância para as médias e para a razão sinal ruído (Tabela 5) obtendo-se a confirmação dos fatores mais significativos para o processo de fabricação da célula em estudo, que são: operações 12, 32 e 114. Estas operações apresentaram coeficiente F acima do valor crítico, bem como, um *P-Value* inferior a 0,05.

Outra conclusão que pode ser obtida da verificação da Tabela 5 é a significância da interação entre as operações 32 e 114. Além disso, apesar de não ter superado o valor de F crítico, a interação entre as operações 12 e 32 alcançou um nível de significância muito próximo a 0,05, demonstrando, assim, que deve ser uma interação a ser analisada cuidadosamente.

Da análise dos gráficos dos efeitos sobre as médias e dos efeitos sobre a razão sinal ruído (Figura 5), bem como dos gráficos das interações dos efeitos das médias e dos efeitos sobre a razão sinal ruído (Figura 6) verificam-se os níveis que melhor atendem a hipótese em estudo para os fatores significativos identificados.

Lembrando que quanto menor o tempo de processamento por peça melhor, observa-se que nas operações 40, 88, 120, 150, 152 e 170, o ajuste no nível inferior ou superior não influi significativamente no processo. Podendo assim permanecer no nível inferior de uma peça e uma máquina para o processo, conforme previsto na Tabela 3.

Nas operações 12, 32 e 114 recomenda-se a utilização do nível inferior. Desse modo, sugere-se manter as operações 12 e 32 trabalhando uma peça de cada vez. Para a operação 114 sugere-se reduzir a operação de duas peças por vez para uma peça. Esta alteração propiciará um equilíbrio do melhor ajuste do processo. A Tabela 6 resume o ajuste ótimo do sistema proposto para o processo de fabricação da peça, tanto pelas conclusões tiradas minimizando o efeito das médias, como maximizando o efeito da razão sinal ruído.

Tabela 5 - Análise de variância para a média e razão sinal ruído

Análise de variância para as médias						Análise de variância para a razão sinal ruído					
Fonte	Graus de liberdade	SQ	SMQ	F	P	Fonte	Graus de liberdade	SQ	SMQ	F	P
P12	1	795.571,00	795.571,00	84.913,73	0	P12	1	304,77	304,773	20,64	0,01
P32	1	1.653.808,00	1.653.808,00	176.515,87	0	P32	1	600	600	40,64	0,003
P40	1	-	-	-	0,996	P40	1	0	0	0	0,998
P88	1	-	-	-	0,936	P88	1	0	0	0	0,997
P114	1	490.659,00	490.659,00	52.369,52	0	P114	1	324,97	324,968	22,01	0,009
P120	1	-	-	0,01	0,926	P120	1	0	0	0	1
P150	1	1,00	1,00	0,10	0,765	P150	1	0	0	0	0,996
P152	1	-	-	0,02	0,888	P152	1	0	0,001	0	0,995
P170	1	-	-	0,01	0,945	P170	1	0	0	0	0,999
P12*P32	1	27,00	27,00	2,89	0,165	P12*P32	1	80,24	80,237	5,43	0,08
P12*P40	1	-	-	0,02	0,899	P12*P40	1	0	0	0	1
P12*P88	1	1,00	1,00	0,09	0,774	P12*P88	1	0	0,001	0	0,994
P12*P114	1	38,00	38,00	4,03	0,115	P12*P114	1	59,06	59,055	4	0,116
P12*P120	1	-	-	0,03	0,881	P12*P120	1	0	0	0	0,999
P12*P152	1	-	-	0,05	0,835	P12*P152	1	0	0	0	0,999
P32*P40	1	-	-	0,02	0,904	P32*P40	1	0	0	0	0,999
P32*P88	1	1,00	1,00	0,11	0,753	P32*P88	1	0	0,001	0	0,995
P32*P114	1	489.887,00	489.887,00	52.287,08	0	P32*P114	1	324,78	324,783	22	0,009
P32*P120	1	-	-	0,01	0,922	P32*P120	1	0	0	0	0,999
P32*P170	1	-	-	-	0,948	P32*P170	1	0	0	0	0,999
P40*P88	1	-	-	0,02	0,883	P40*P88	1	0	0	0	0,999
P40*P114	1	-	-	0,02	0,902	P40*P114	1	0	0	0	0,997
P40*P120	1	-	-	0,03	0,881	P40*P120	1	0	0,001	0	0,994
P88*P114	1	-	-	0,02	0,886	P88*P114	1	0	0	0	0,999
P88*P120	1	-	-	-	0,963	P88*P120	1	0	0	0	0,999
P114*P120	1	-	-	0,02	0,89	P114*P120	1	0	0	0	0,998
P120*P150	1	-	-	0,01	0,931	P120*P150	1	0	0	0	0,997
Erro residual	4	37,00	9,00			Erro residual	4	59,06	14,764		
Total	31	3.430.033,00				Total	31	1752,88			

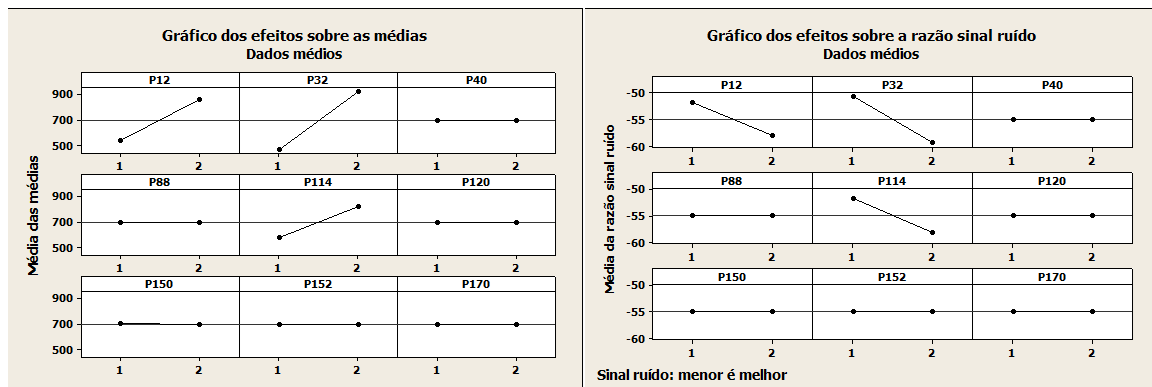


Figura 5 - Gráfico dos efeitos dos fatores sobre a média e a razão sinal ruído

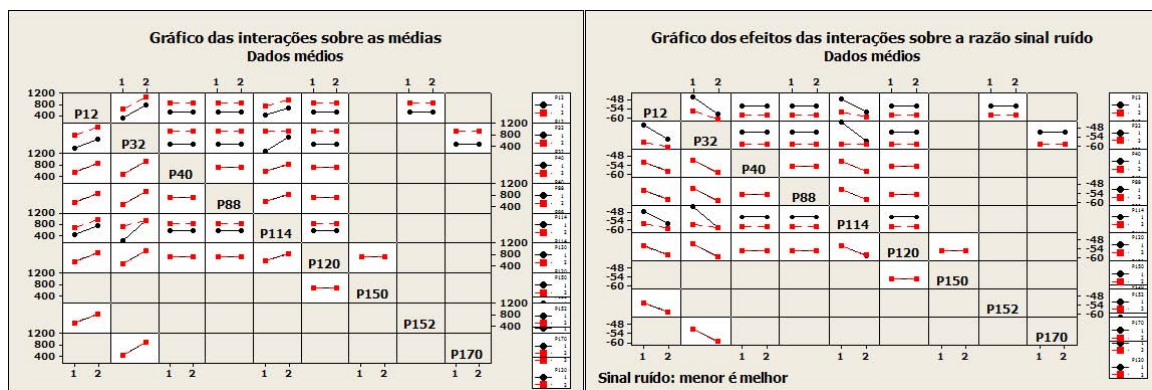


Figura 6 - Gráfico dos efeitos das interações sobre as médias e a razão sinal ruído

Tabela 6 - Melhor ajuste proposto ao processo

	P12	P32	P40	P88	P114	P120	P150	P152	P170
Efeitos das médias	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Efeitos razão sinal ruído	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Como forma de avaliar os ganhos com o cenário proposto, o comparativo entre o número de peças produzidas e o tempo médio de produção, com a configuração atual e a configuração sugerida nesse trabalho, foram agrupados na Tabela 7. Como pode ser visto o número de peças permanece praticamente constante, enquanto que o tempo de processamento das peças cai consideravelmente, de aproximadamente 560,9 horas para 69,9 horas em média.

Tabela 7 – Resultados apurados

	Configuração inicial	Configuração sugerida
Número de peças	6763	6761
Desvio Padrão	17	12
Tempo médio/peça (horas)	560,89	69,81
Desvio Padrão	2,38	1,02

6. Considerações finais

A principal contribuição deste estudo foi corroborar, que o uso conjunto das técnicas de simulação a eventos discretos e a otimização pelo emprego de arranjo ortogonal de Taguchi é viável, auxiliando de modo significativo os tomadores de decisão. A combinação destas ferramentas evitam o desperdício de tempo e recursos cada vez mais importantes para a indústria, que busca aumentar sua eficiência e eficácia através da otimização de seus processos.

Na execução da pesquisa foram utilizadas técnicas de mapeamento para descrever as fases de projeto e o desenvolvimento do processo produtivo, bem como, utilizou-se da metodologia de modelagem e simulação em conjunto com técnicas de planejamento e análise de experimentos (arranjos ortogonal de Taguchi L32) que possibilitaram analisar as possíveis melhorias no processo.

O emprego do arranjo ortogonal de Taguchi teve como principal vantagem a realização da pesquisa das configurações possíveis para o processo estudado, com um número reduzido de experimentos, neste caso, com 32 cenários. Dessa forma, o tempo de processamento do modelo computacional na análise dos cenários prováveis foi reduzido.

O objetivo proposto para esta pesquisa era verificar a configuração do processo que proporcionasse o menor tempo de processamento por peça. Comparando-se a configuração inicial em utilização pela empresa com a configuração proposta para aplicação, houve uma redução significativa no tempo de processamento das peças produzidas, conforme verificado na Tabela 7. Assim observa-se que a configuração sugerida reduziu aproximadamente em 87,6% o tempo de processamento das peças, considerando a produção global no período, bem como, as peças descartadas.

Desse modo, conclui-se que o emprego de simulação, planejamento e análise de experimentos, e em particular os arranjos ortogonais de Taguchi, são ferramentas extremamente úteis para o estudo de processos em células de manufatura, trazendo embasamento estatístico e argumentação sólida para modificações de procedimentos em processos ou, ainda na verificação dos benefícios alcançados antes de se autorizar um investimento de vulto ou mesmo sua modificação. Para trabalho futuro, sugere-se a comparação dos resultados obtidos através do emprego da otimização via simulação com os apresentados neste trabalho, a fim de determinar cenários ótimos de maneira mais eficiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FAPEMIG e Padtec pelo suporte dado a esta pesquisa.

Referências

- Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M.** *Discrete-event system simulation*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- Bertrand, J.W.M.; Fransoo, J.C.** Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- Brooks R. J.; Robinson, S.** *Simulation, with Inventory Control, Operational Research Series*. Basingstoke: Palgrave. 2001.
- Chwif, L.; Medina, A. C.** Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações. São Paulo: Ed. dos Autores. 2010.
- Costa, R. F. da S.** *Abordagem sistemática para avaliação econômica de cenários para modelos de simulação discreta em manufatura*. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2010.
- Garza-Reyes, J. A.; Eldridge, S.; Barber, K. D. e 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.
- Gomes, J. H. F.** *Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono utilizando arame tubular inoxidável austenítico*. 2010. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, 2010.
- Harrel, Charles R.; Mott, J. R. A.; Bateman, R. E.; Bowden, R. G.; Goog, T. J.** *Simulação: Otimizando os Sistemas*. Belge Engenharia e Sistemas Ltda, IMAM, 2 editora. São Paulo, SP, 2002.
- Kelton, W.D.** Designing simulation experiments. In: *WINTER SIMULATION CONFERENCE, Proceedings*. New Orleans, LA, USA, 2003.
- 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.M.; McComas, M.G.** Simulation of manufacturing systems. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* Piscataway, NJ, USA, 1998.
- Law, A. M.; Kelton, D. W.** *Simulation modeling and analysis*. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- Law, A. M.** How to build valid and credible simulation models. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings...* Austin, TX, USA, 2009.
- 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.
- Montgomery, D.C.** *Design and Analysis of Experiments*. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- Montevechi, J. A. B.; Pinho, A. F. de; Leal, F.; Marins, F. A. S.** Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings*. Washington, DC, USA, 2007.
- Montevechi, J. A. B.; Leal, F.; Pinho, A. F. de; Costa, R. F da S.; Oliveira, M. L. M. de; SILVA, A. L. F. da.** (2010). Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted idef: an application in a brazilian tech company. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings of the 2010*, 1624-1635.
- Morabito, R.; 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, 2010. cap 8, 165-194.
- O'kane, J.F.; Spenceley, J.R.; Taylor, R.** Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. *Journal of Materials Processing Technology* 107 412±424, 2000.
- Sargent, R. G.** Verification and validation of simulation models. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings*. Austin, TX, USA, 2009.
- Shannon, R. E.** (1998) Introduction to the art and science of Simulation. In: *Winter Simulation Conference, Proceedings*. Piscataway, 1998.; Institute of Electrical and Electronics Engineers, p. 7-14.