

METODOLOGIA PARA EMPREGO DA BIFURCAÇÃO SEQUENCIAL PARA SELEÇÃO DE VARIÁVEIS EM MODELOS DE SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS

Luiz Fernando Pereira

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

José Arnaldo Barra Montevechi

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Caixa Postal 50, CEP 37500-903, Itajubá, MG
montevechi@unifei.ebu.br

Ubirajara Rodrigues

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

Rafael de Carvalho Miranda

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

RESUMO

Nos últimos quarenta anos o uso da simulação a eventos discretos foi a principal ferramenta empregada na área da Pesquisa Operacional. Neste período, a competição pelos mercados cresceu e muitas empresas buscaram auxílio da academia para desenvolvimento de ferramentas de gestão. O uso de técnicas de simulação, projetos de experimentos e otimização atrai os pesquisadores e Jack C. Kleijnen batizou de DASE (*Design and Analysis of Simulation Experiments*) esta área do conhecimento. A complexidade dos sistemas de manufatura, sobretudo quanto ao número de fatores envolvidos, enseja o uso de técnicas de seleção de variáveis. Neste cenário, a Bifurcação Sequencial é uma alternativa aos arranjos fatoriais pois, com menos experimentos, pode atingir resultados semelhantes. Este trabalho apresenta uma metodologia para uso da Bifurcação Sequencial para determinar as variáveis relevantes para o processo realizando poucos experimentos simulados. Uma aplicação prática, de cunho didático, será empregada para facilitar o entendimento da técnica.

PALAVRAS CHAVE. Bifurcação Sequencial, Simulação a eventos discretos, Análise de Sensibilidade.

Área principal : SIM - Simulação

ABSTRACT

Over 40 years discrete-event simulation has been the most popular tool of Operational Research. Competition for market-share grows in this period and lots of enterprises ask the University for help to develop management tools. Papers using simulation, design of experiments and optimization together has improved and Jack C. Kleijnen has introduced the acronym DASE (*Design and Analysis of Simulation Experiments*) to represent this knowledge area. To analyze complex manufacturing systems, mainly those within many factors, is important to use screening strategies. In this case, Sequential Bifurcation shows itself a useful way to goal the same work the factorial designs do using, however, less runs. This paper will show a methodology to use Sequential Bifurcation to identify those few factors which have a strong influence in a particular process, by running a few simulation experiments. In order to favor the understanding the researcher will present a practical application.

KEYWORDS. Sequential Bifurcation. Discrete-event Simulation. Process Screening.

Main area : SIM - Simulation

1. Introdução

Nos últimos quarenta anos o uso da simulação a eventos discretos foi a principal ferramenta empregada pela comunidade científica na área da Pesquisa Operacional (SIEBERS *et al.*, 2010). A simulação é empregada para estudar sistemas complexos por ser mais barata, rápida e flexível que a experimentação com sistemas reais, cuja manipulação, consumiria enormes recursos (SHEN e WAN, 2009; SHARDA e BURY, 2011). A busca pelo melhor desempenho dos processos industriais, aliada a necessidade reduzir o custo dos investimentos, estimulou o emprego da simulação nas empresas modernas (MONTEVECHI *et al.*, 2009; BESSERIS, 2012).

Entre as principais finalidades da experimentação, e da simulação, pode-se elencar o conhecimento, análise e otimização dos resultados obtidos pelo objeto de estudo (ESKANDARI *et al.*, 2011; KLEIJNEN *et al.*, 2011; BESSERIS, 2012). Entretanto, os sistemas reais estão sobre a influência de diversos fatores e ruídos o que pode dificultar sobremaneira a modelagem matemática, inviabilizar a experimentação e introduzir muitas variáveis nos modelos de simulação (O'KANE *et al.*, 2000; DEAN e LEWIS, 2002; SHEN e WAN, 2009; KLEIJNEN, 2009). Nestas condições, é aconselhável empregar métodos de seleção de variáveis (análise de sensibilidade) para investigar quais são aquelas realmente relevantes para o processo. (CAMPOLONGO e BRADDOCK, 1999; MONTGOMERY, 2005; MAGALLANES e OLIVIERI, 2010; KLEIJNEN *et al.*, 2011; BESSERIS, 2012).

A análise de sensibilidade aplicada a modelos de simulação estima a variação nos dados de saída do modelo em função das alterações nos dados de entrada do mesmo (CAMPOLONGO e BRADDOCK, 1999; KLEIJNEN, 2009). Existem diversas técnicas para estimar a influência das variáveis, e suas interações, nos dados de saída, e a demanda por recursos computacionais cresce com a inclusão dos efeitos de maior ordem. A seleção do método de análise de sensibilidade deve considerar as qualidades e fraquezas do mesmo, principalmente quando se trabalha com modelos com múltiplas variáveis. Neste caso, é muito importante trabalhar com uma técnica que permita reduzir o número de experimentos necessários para ranqueá-las. (BETTONVIL e KLEIJNEN, 1996; CAMPOLONGO e BRADDOCK, 1999; KLEIJNEN, 2009).

Este trabalho pretende apresentar uma metodologia para a aplicação da técnica denominada “Bifurcação Sequencial” (BS) para determinar a relevância de variáveis de entrada de um modelo de simulação a eventos discretos. Esta técnica foi originalmente proposta por Bettonvil e Kleijnen (1996), pode reduzir drasticamente o número de experimentos necessários para identificar as variáveis importantes e quantificar seus efeitos. O modelo utilizado para exemplificar a aplicação da metodologia foi desenvolvido por pesquisadores da UNIFEI e representa, adequadamente, a área de lavanderia de um hospital.

Formalmente, o artigo encontra-se estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma breve explanação sobre simulação a eventos discretos, técnica que deve ser explorada em conjunto com a BS. A seção 3 apresenta uma comparação entre “Projetos de Experimentos” clássicos (DOE) e “Projeto e Análise de Experimentos Simulados” (DASE), proposta por Kleijnen. A seção 4 apresenta esclarecimentos sobre Análise de Sensibilidade. A seção 5 apresenta a metodologia para aplicação da “Bifurcação Sequencial”, que é o objetivo principal do artigo. A seção 6 apresenta a aplicação da metodologia para seleção das variáveis relevantes em um modelo real validado e enumera propostas para trabalhos futuros e, finalmente, a seção 7 apresenta as conclusões do trabalho.

2. Simulação a eventos discretos

De acordo com O'Kane *et al.* (2000) e Chwif e Medina (2006) os modelos de simulação constituem um dos métodos mais populares e eficazes para análise de sistemas complexos, categoria em que, em virtude da dificuldade para modelagem matemática, se enquadram os processos de manufatura (SHEN e WAN, 2009). Kleijnen (2009), por sua vez, define um modelo de simulação como um modelo dinâmico, criado para ser resolvido por experimentação, uma vez que os pesquisadores não conseguem, ou pretendem, criar um modelo matemático adequado.

A simulação pode ser aplicada em várias fases de um processo: na concepção, para avaliar cenários ou estimar resultados ou na fase operacional, para conhecer o processo ou buscar melhor desempenho (SHEN e WAN, 2009; MAGALLANES e OLIVIERI, 2010, SHARDA e BURY, 2011). O uso da simulação em estudos de sistemas industriais requer a estruturação prévia do problema, a seleção criteriosa das pessoas envolvidas e a percepção de que um modelo sempre será uma aproximação do sistema real, independente de quanto dinheiro ou tempo seja gasto para desenvolvê-lo (LAW, 2006; KLEIJNEN, 2009).

Para Law (2006) e Shen e Wan (2009) o uso de um modelo de simulação é um importante instrumento para a experimentação com sistemas reais, possibilitando minimizar custos e gastos, desde que o modelo represente de maneira satisfatória as características do processo estudado. Assim, antes de iniciar o processo de construção do modelo de simulação é interessante interagir com os gestores visando levantar os múltiplos objetivos ou metas relevantes. Além disso, deve-se observar que os resultados serão representativos se o modelo for validado (SARGENT, 2004)

Law e Kelton (2000) classificam os modelos de simulação em:

- modelos dinâmicos ou estáticos: conforme considerem ou não a variável tempo;
- modelos estocásticos ou determinísticos: conforme utilizem variáveis aleatórias ou usem médias históricas;
- modelos discretos ou contínuos: conforme considerem o fluxo do tempo atrelado a ocorrência de um evento ou contínuo independente de alteração nos elementos do modelo.

Baines *et al.* (2004) afirmam que a simulação a eventos discretos é adequada quando mudanças discretas predominam no sistema modelado. Para os autores, mudanças discretas são observadas em muitos sistemas de manufatura, ou seja, as mudanças ocorrem em pontos distintos do tempo e, entre estes instantes, o sistema permanece inalterado.

Sob o enfoque da simulação, um sistema consiste de entidades, atividades, recursos e controles (HARRELL *et al.*, 2000). Esses elementos definem quem, o quê, quando, onde e o como ocorre o processamento da entidade na simulação.

Entidades: são os itens processados através do sistema tais como produtos, clientes e documentos. (HARRELL *et al.*, 2000).

Atividades: são tarefas realizadas no sistema que estão direta ou indiretamente envolvidas no processamento das entidades. (HARRELL *et al.*, 2000)

Recursos: são os meios pelos quais as atividades são realizadas. Eles fornecem as instalações de apoio, equipamentos e pessoal para condução das atividades (HARRELL *et al.*, 2000);

Controles: definem as regras do sistema. No mais alto nível, os controles consistem de programação, planos e políticas. No mais baixo nível, os controles fornecem as informações e a lógica de decisão de como o sistema deve operar. (HARRELL *et al.*, 2000)

Os autores Sargent (2004), Law (2006) e Montevechi *et al.* (2007) defendem que, para que o modelo represente adequadamente o sistema, todas as etapas devem ser validadas e/ou verificadas. A etapa de verificação refere-se à correta implementação do programa ou modelo de simulação, a etapa de validação refere-se a correta representação do sistema pelo modelo de simulação. O objetivo da primeira é verificar se não há erros no programa que estejam impedindo a sua execução ou causando a execução de modo não previsto. O foco da segunda é confrontar os resultados do modelo de simulação com os dados do sistema real para verificar se a parametrização adotada reproduz seu comportamento.

A ferramenta de simulação selecionada pelo autor foi o programa ProModel[®] que segundo os autores Harrell (2000), Montevechi (2007), Sakurada e Miyake (2009), apresenta as seguintes vantagens: abordagem gráfica de fácil construção e entendimento, caixas de diálogo completas, disponibilidade de animação gráfica e possibilidade de elaboração de cenários para estudos futuros.

3. “Projetos de Experimentos” clássicos (DOE) e “Projeto e Análise de Experimentos Simulados” (DASE)

Segundo Kleijnen (2009) a teoria de Projetos de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE) originou-se na década de 1920, focada em experimentos reais, realizados na área agricultura. Evoluiu para incluir experimentos na área de química, na década de 1950, e, atualmente, aplica-se a áreas do conhecimento focadas em educação, serviços e indústrias de vários ramos.

Montgomery (2005) assegura que qualquer experimento realizado segue um planejamento que pode ser incipiente ou estruturado. Além disso, o autor defende que o sucesso na execução do experimento depende em grande parte (80%) da maneira como ele foi planejado (projetado). Segundo seu entendimento, o DOE fornece ao pesquisador uma sequência lógica para realização dos experimentos e, em cada projeto, garante que serão testadas todas as possíveis combinações de níveis das variáveis.

Classicamente o DOE define dois níveis de valor (ou estado) para cada variável (MAGALLANES e OLIVIERI, 2010) e, conforme o entendimento de Montgomery (2005) os arranjos fatoriais, neste caso, são a estratégia mais adequada para executar os experimentos. Estes projetos demandam a realização de 2^k experimentos, onde k é o número de variáveis. Verifica-se, então, que esta formulação acarreta o rápido crescimento do número de experimentos pela adição de variáveis ao planejamento inicial.

Conforme Kleijnen (2009) para estimar os coeficientes de uma primeira aproximação matemática de um sistema (metamodelo), um polinômio de primeira ordem, são necessários $k+1$ experimentos, ou seja: considerando um sistema com cinco variáveis, serão necessários 6 experimentos para construir o polinômio. Os arranjos fatoriais fracionados permitem testar as combinações das variáveis com menos experimentos se comparados com os fatoriais completos. Um dos arranjos mais conhecidos e explorados é o modelo de proposto pelos pesquisadores Plackett-Burman, em 1946 (MAGALLANES e OLIVIERI, 2010).

O emprego conjunto de técnicas de simulação e programas específicos para otimização cresceu nos últimos anos como reflexo do crescimento da capacidade de processamento e redução dos preços dos computadores (MONTEVECHI *et al.*, 2009; ESKANDARI *et al.*, 2011). Neste contexto, Kleijnen (2009) propôs o uso do acrônimo DASE (*Design and Analysis of Simulation Experiments*) para representar o uso do DOE combinado com a simulação.

Aos olhos do pesquisador Kleijnen (2009) seria interessante relacionar a técnica ao tipo de experimento realizado da seguinte forma:

- a. *Design of Experiments* (DOE) – projetos de experimentos reais, manipulando os sistemas físicos e executando a experimentação na prática;
- b. *Design and Analysis of Computer Experiments* (DACE) – experimentos com modelos computacionais para engenharia provenientes dos aplicativos do tipo CAD/CAE. Os modelos virtuais em foco são determinísticos e, muitas vezes, geram protótipos de produtos;
- c. *Design and Analysis of Simulation Experiments* (DASE) – projetos de experimentos com modelos virtuais (simulados) de sistemas reais, onde os dados de entrada são ocorrências de determinados fatos de interesse. Normalmente, os fatores de entrada e saída dos modelos são representados por dados estatísticos e, nesta categoria, se enquadra a Simulação e Eventos Discretos.

Seguindo a classificação proposta por Kleijnen (2009), este trabalho insere-se na terceira categoria por tratar-se da aplicação conjunta de técnicas de análise de sensibilidade e simulação a eventos discretos.

4. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade aplicada a modelos de simulação estima a variação nos dados de saída do modelo em função das alterações nos dados de entrada do mesmo (CAMPOLONGO e BRADDOCK, 1999; KLEIJNEN, 2009).

Segundo Campolongo e Braddock (1999) existem diversas técnicas para estimar a influência das variáveis, e suas interações, nos dados de saída e elas se agrupam em três classes principais:

- métodos de seleção de variáveis: quando o objetivo é identificar as variáveis mais relevantes para o processo sujeito a um grande número de fatores;
- métodos para avaliação da sensibilidade global: quando o objetivo é avaliar a variação dos dados de saída em função da variação dos dados de entrada;
- métodos para avaliação da sensibilidade local: pelo emprego das derivadas parciais investiga-se o comportamento da função de saída do modelo em decorrências da variação dos parâmetros de entrada.

Conforme os autores há diversos métodos capazes de estimar os efeitos principais e de ordens superiores, porém, a maioria das técnicas exige grande esforço computacional. Afirmam os pesquisadores que, mesmo os arranjos fatoriais fracionados, podem demandar muitos experimentos se o número de variáveis for elevado ou se os efeitos de ordens superiores forem considerados individualmente, ou seja, sem confundimentos com efeitos principais, de primeira ou segunda ordem.

Sob este prisma, a seleção do método de análise de sensibilidade é uma decisão relevante pois, quando se trabalha com modelos com múltiplas variáveis, a escolha errada pode levar a um número inexequível de experimentos (CAMPOLONGO e BRADDOCK, 1999). Por outro lado, a realização de um número insuficiente de experimentos pode inviabilizar a pesquisa ou comprometer suas conclusões (MONTGOMERY, 2005).

Edwards e Truong (2011) afirmam que a realização de experimentos sequenciais é uma prática comum nos estudos de otimização: há uma primeira fase destinada a seleção das variáveis importantes na qual se aplicam arranjos com o mínimo de experimentos e outras fases, destinadas a otimização dos resultados, onde são empregadas técnicas mais refinadas.

Para Kleijnen (2009) as observações iniciais podem basear-se em arranjos fatoriais fracionados, combinados com análise de variância (ANOVA) ou aplicar outras técnicas, como a Bifurcação Sequencial, proposta original de Bettonvil e Kleijnen (1996). Em ambos os casos, porém, as variáveis pinçadas devem passar por experimentos de confirmação posteriores.

A proposta deste trabalho é apresentar uma metodologia para o emprego da Bifurcação Sequencial para identificação das variáveis relevantes em experimentos simulados, focando nos efeitos principais das variáveis. Será apresentado um exemplo de aplicação da metodologia para facilitar o entendimento da mesma e testar a sua eficiência. A fase de otimização do modelo simulado à partir da manipulação das variáveis selecionadas pelo método proposto não será abordada na presente pesquisa.

5. Bifurcação Sequencial

A Bifurcação Sequencial foi originalmente desenvolvida por Bert Bettonvil, em sua tese de doutorado, e as primeiras publicações da técnica, no *European Journal of Operational Research*, datam de 1996 e 1997 (KLEIJNEN, 2008). Sua aplicação principal, no universo do DASE, é auxiliar o pesquisador a selecionar as variáveis importantes dentro de um grupo maior de fatores que influenciam um processo.

Segundo Bettonvil e Kleijnen (1996), o Princípio de Pareto (Regra 80-20) aplica-se perfeitamente aos modelos de simulação. Assim, entendem que o pesquisador pode, e deve, tentar selecionar as variáveis de interesse dentre aquelas que podem variar em seu modelo, otimizando o rendimento de seus recursos computacionais e melhorando a qualidade dos dados que manipula. Sugerem os autores que, ao eliminar variáveis sem relevância, o pesquisador pode simplificar o seu modelo e facilitar o seu entendimento, atendendo ao Princípio da Parcimônia, proposto pelo filósofo inglês, Okam, no século XVII, segundo o qual: “se há mais de uma explicação para uma dada observação, deve-se adotar a mais simples”.

Apesar de ser objeto de estudo há quase duas décadas ainda não foi proposta uma metodologia, na forma de um fluxograma, para sua aplicação o que é o objetivo principal deste

trabalho.

Espera-se que o fluxograma apresentado possa facilitar o entendimento da técnica e orientar sobre a aplicação da Bifurcação Sequencial como ferramenta para a identificação de variáveis relevantes em modelos de simulação.

Formalmente, o fluxograma será dividido em dois grupos principais: Premissas e Aplicação.

Para fins de identificação da metodologia para emprego da Bifurcação Sequencial ela será batizada de Metodologia GURI.

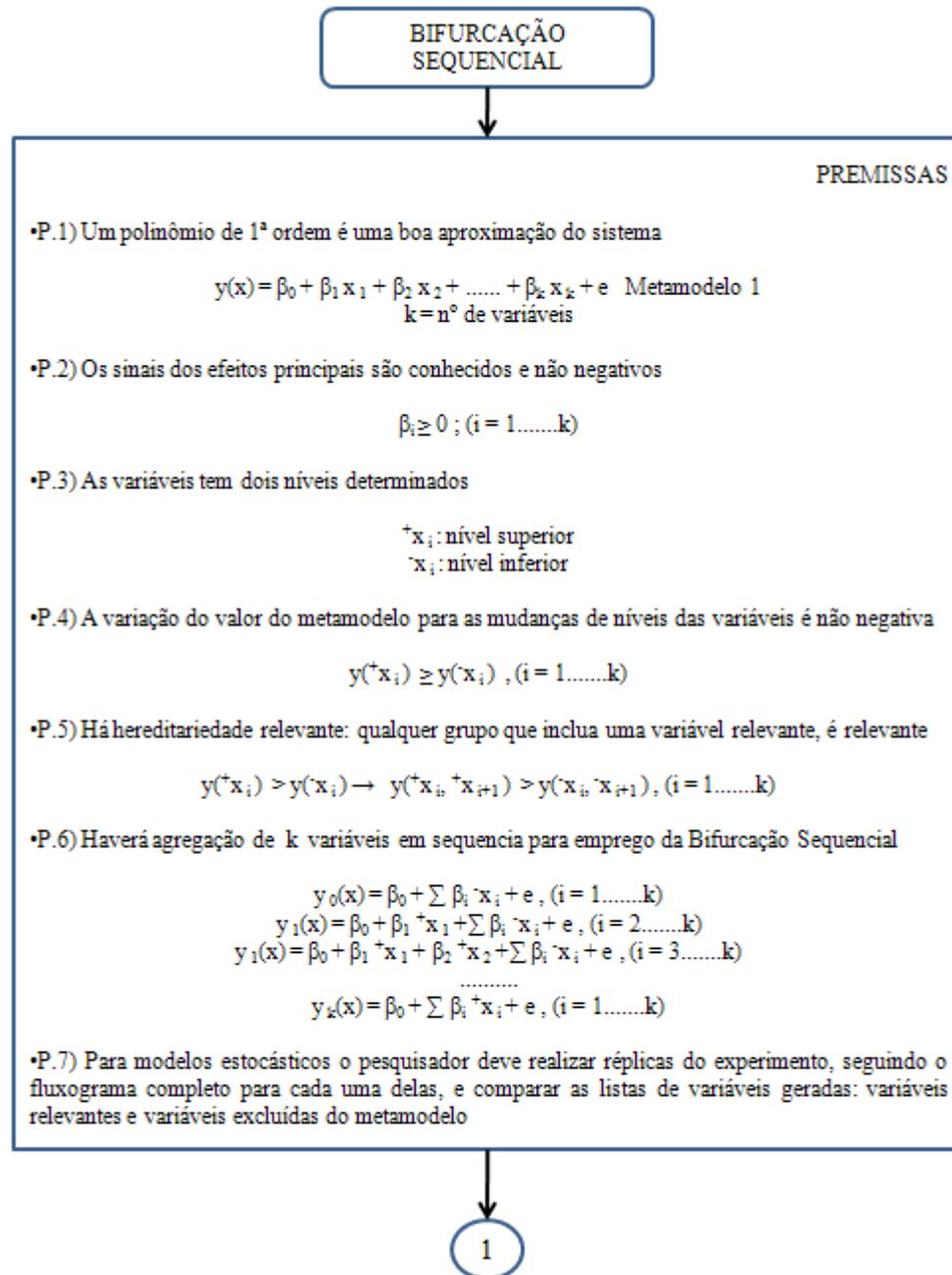


Figura 1 – Metodologia GURI - Fase Premissas

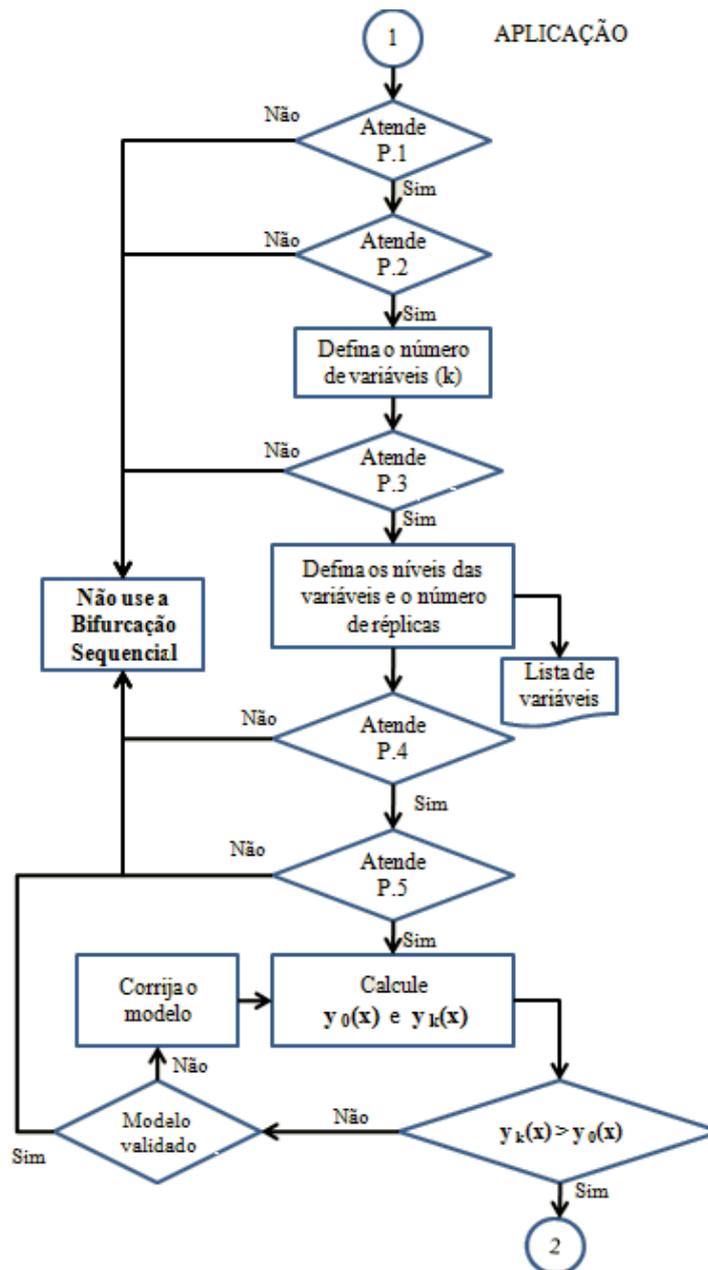


Figura 2 – Metodologia GURI - Fase Aplicação (1ª Parte)

A Figura 2 apresenta o teste das premissas e a primeira bifurcação. É importante salientar que o pesquisador, ao optar pelo emprego da Bifurcação Sequencial, deve admitir que as premissas 1 e 5 são verdadeiras.

Em relação às outras premissas verifica-se que:

- as premissas 2, 3 e 4, serão atendidas pela correta construção do modelo;
- a premissa 6 é o princípio de funcionamento do método;
- a premissa 7 decorre da aplicação da estatística ao modelo e garante que uma variável não será descartada pela ocorrência de um valor particular que a desqualifique.

A Figura 3 apresenta o ciclo de bifurcações que conduzirá a redução do número de variáveis agrupadas. Este ciclo deve ser repetido até que o pesquisador entenda que os resultados alcançados são satisfatórios.

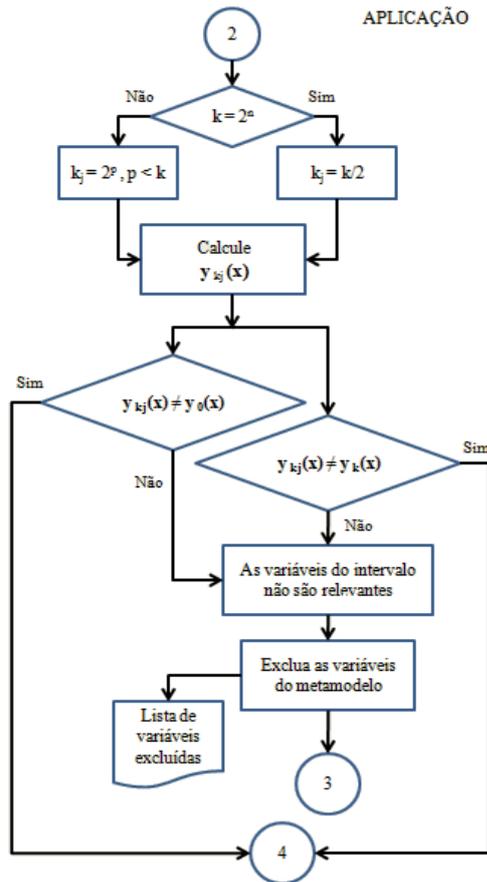


Figura 3 – Metodologia GURI – Fase Aplicação (2ª Parte)

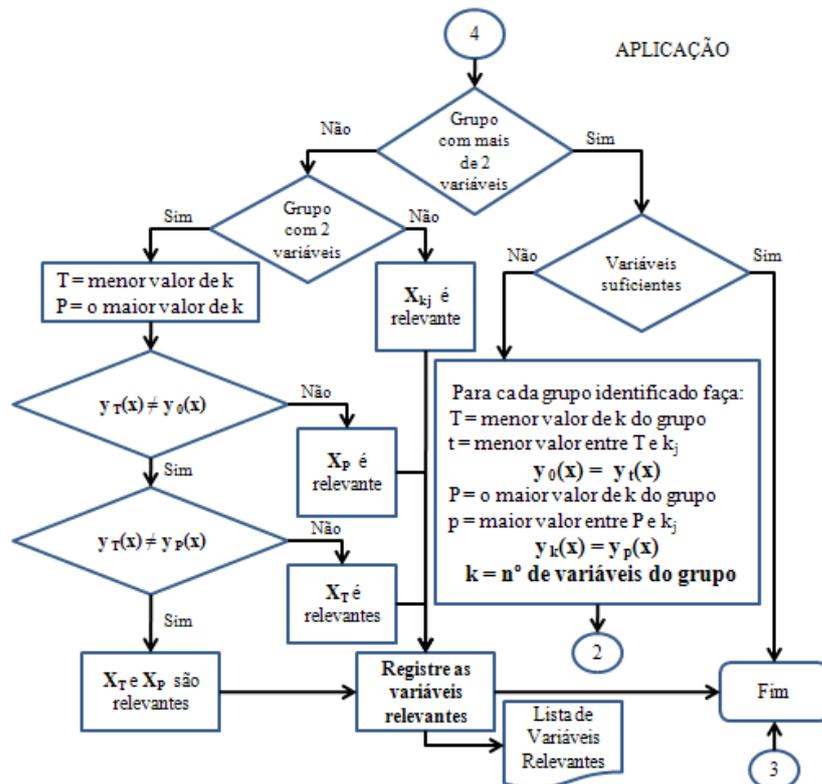


Figura 4 – Metodologia GURI – Fase Aplicação (3ª Parte)

A Figura 4 apresenta o tratamento dos grupos finais, compostos por uma ou duas variáveis em teste. O pesquisador, ao registrar as variáveis relevantes isoladas encerra as bifurcações pois os efeitos, por ventura agrupados, não serão significativos.

5. Objeto de estudo

O modelo escolhido para aplicação da metodologia foi desenvolvido por pesquisadores da UNIFEI e representa, adequadamente, o setor de lavanderia de um hospital. Na ocasião os gestores precisavam identificar as restrições do sistema para direcionamento de investimentos e políticas de RH e os dados foram parametrizados conforme apresentado na Tabela 1 – Dados Relevantes para Simulação. O resultado medido pelo sistema é o total, em quilogramas, de roupas beneficiadas na lavanderia.

Tabela 1– Dados Relevantes para Simulação

Variável	Recursos	Nível Inferior	Nível Superior	Efeito
X1	Recebimento	1	2	+
X2	Separação	1	2	+
X3	Pesagem	1	2	+
X4	Pré-lavagem	1	2	+
X5	Lavadora	1	2	+
X6	Centrífuga	1	2	+
X7	Secadora	1	2	+
X8	Calandra	1	2	+
X9	Dobragem	1	2	+
X10	Armazenagem	1	2	+

A metodologia proposta (Metodologia GURI) será aplicada por fases e cada fase dividida nas partes sequenciais apresentadas neste trabalho:

Fase Premissas:

P.1- para emprego da Bifurcação Sequencial (BS) o pesquisador precisa admitir que um polinômio de primeira ordem é uma boa aproximação do sistema;

P.2 – a alteração do nível das variáveis é sempre positiva;

P.3 – as variáveis foram definidas com dois níveis (inferior e superior) conforme se disponha de uma ou duas unidades de cada recurso;

P.4 – estima-se que a alteração de nível da cada variável contribua para o aumento da capacidade do sistema;

P.5 - para emprego da Bifurcação Sequencial (BS) o pesquisador precisa admitir que há hereditariedade relevante;

P.6 – procedimento operacional da BS;

P.7 – cada rodada do modelo ocorre com três réplicas para obtenção de dados estocásticos. Em função das variações dos dados de entrada serão considerados iguais os dados com desvio de até 5%.

Fase Aplicação – 1ª Parte

Tabela 2– Resultados Fase Aplicação – 1ª Parte

Atende P.1	Atende P.2	Nº de Variáveis	Atende P.3	Nível		Nº de Réplicas	Atende P.4	Atende P.5	Valor $y_0(x)$	Valor $y_{10}(x)$
				Inf	Sup					
Sim	Sim	10	Sim	1	2	3	Sim	Sim	18630	36490

A Tabela 2 – Resultados Fase Aplicação – 1ª Parte apresenta os resultados dos testes das premissas e as médias dos valores gerados pelo modelo considerando as variáveis no nível inferior ($y_0(x)$) e no nível superior ($y(x)$). Esta fase se encerra com a comparação entre os valores obtidos: verifica-se que $y_{10}(x) > y_0(x)$ e, desta forma, segue-se o fluxo para iniciar as bifurcações.

Fase Aplicação – 2ª Parte

Tabela 3– Resultados Fase Aplicação – 2ª Parte

Valor k	Valor n	Valor k _j	Valor y ₈ (x)	y ₈ (x) ≠ y ₀ (x)	y ₈ (x) ≠ y ₁₀ (x)
10	3	8	36699	Sim	Não

A Tabela 3 – Resultados Fase Aplicação – 2ª Parte apresenta os dados resultantes das ações previstas na metodologia.

A primeira bifurcação ocorre pelo agrupamento das oito primeiras variáveis representadas pelo valor de y₈(x).

Seguindo a metodologia conclui-se que as variáveis X9 e X10 não são relevantes (significativas) assim os postos “Dobragem” e “Armazenagem” passam a compor a Lista de Variáveis Excluídas. Analogamente, conclui-se que o grupo das oito primeiras é significativo e, desta forma, segue-se o fluxo para realização das bifurcações sequenciais.

Fase Aplicação – 3ª Parte

Tabela 4– Resultados Fase Aplicação – 3ª Parte (2ª Bifurcação)

Grupo com mais de 2 variáveis	Variáveis Relevantes Suficientes	Valor T	Valor t	Valor P	Valor p	Valor k	Valor k/2	Valor y ₄ (x)	y ₄ (x) ≠ y _t (x)	y ₄ (x) ≠ y _p (x)
Sim	Não	0	0	8	8	8	4	19610	Não	Sim

A segunda bifurcação ocorre pelo agrupamento das quatro primeiras variáveis representadas pelo valor de y₄(x).

Seguindo a metodologia conclui-se que as variáveis X1, X2, X3 e X4 não são relevantes assim os postos, “Recebimento”, “Separação”, “Pesagem” e “Pré-lavagem”, passam a compor a Lista de Variáveis Excluídas. Analogamente, conclui-se que o grupo formado pelas variáveis X5, X6, X7 e X8 é significativo e, desta forma, segue-se o fluxo para realização das bifurcações sequenciais.

Tabela 5– Resultados Fase Aplicação – 3ª Parte (3ª Bifurcação)

Grupo com mais de 2 variáveis	Variáveis Relevantes Suficientes	Valor T	Valor t	Valor P	Valor p	Valor k	Valor k/2	Valor y _t (x)	y _{5,6} (x) ≠ y _t (x)	y _{5,6} (x) ≠ y _p (x)
Sim	Não	5	4	8	8	4	2	36800	Sim	Não

A terceira bifurcação ocorre pelo agrupamento das variáveis X5 e X6 representadas pelo valor de y_{5,6}(x).

Seguindo a metodologia conclui-se que as variáveis X7 e X8 não são relevantes assim os postos, “Secadora” e “Calandra”, passam a compor a Lista de Variáveis Excluídas. Analogamente, conclui-se que o grupo formado pelas variáveis X5 e X6 é significativo e, desta forma, segue-se o fluxo para realização das bifurcações sequenciais.

Tabela 6– Resultados Fase Aplicação – 3ª Parte (4ª Bifurcação)

Grupo com 2 ou mais variáveis	Valor T	Valor P	Valor y _T (x)	y _T (x) ≠ y ₀ (x) y ₅ (x) ≠ y ₀ (x)	y _T (x) ≠ y _P (x) y ₅ (x) ≠ y ₆ (x)
Não	5	6	36140	Sim	Não

A quarta bifurcação ocorre pelo teste da variável X5, representada valor de y₅(x).

Seguindo a metodologia conclui-se que a variável X6 não é relevante assim o posto, “Centrífuga”, passa a compor a Lista de Variáveis Excluídas. Analogamente, conclui-se que a variável X5 é relevante e, por compor um grupo unitário, ela passa a compor a Lista de Variáveis Relevantes, segue-se o fluxo para finalização da metodologia.

Lista de Variáveis Excluídas: “Recebimento” (X1), “Separação” (X2), “Pesagem” (X3),

“Pré-lavagem” (X4), “Centrifuga” (X6), “Secadora” (X7), “Calandra” (X8), “Dobragem” (X9) e “Armazenagem” (X10).

Lista de Variáveis Relevantes: “Lavadora” (X5).

A aplicação da BS permitiu identificar uma única variável relevante (X5) que é o número de lavadoras. De fato, se forem recuperados os dados de saída do modelo, o único recurso que trabalha 100% do tempo simulado é o que representa a lavadora.

Conforme preconizam as técnicas clássicas de projetos de experimentos, a seleção de variáveis poderia ser obtida por um arranjo fatorial do tipo Plackett-Burman e, neste caso, seriam necessários 11 experimentos (e suas réplicas) para obtenção do resultado. O emprego da Bifurcação Sequencial, segundo a metodologia GURI, atingiu os mesmos resultados com apenas seis experimentos o que representa uma redução de 46% do esforço computacional.

A escolha de um modelo de baixa complexidade permitiu a apresentação didática da metodologia, no entanto, Kleijnen (2009) reporta o uso da BS para seleção de variáveis em modelos com centenas de fatores, com o mesmo sucesso.

Futuras pesquisas poderão focar nos seguintes aspectos:

- testar o potencial de emprego da metodologia proposta em modelos complexos, com múltiplas variáveis;
- elaborar testes comparativos entre a BS e as demais técnicas de análise de sensibilidade;
- desenvolver, com base na Metodologia GURI, um aplicativo computacional para BS;
- empregar a BS como etapa inicial, e preparatória, para otimização, via simulação, de processos industriais.

6. Conclusão

O presente estudo permite concluir que, com a realização de um pequeno número de experimentos, a metodologia apresentada permitiu empregar da Bifurcação Sequencial para identificar as variáveis relevantes para o processo simulado.

Considerando os projetos de experimentos clássicos, especialmente os arranjos fatoriais do tipo Plackett-Burman, houve a redução de 46% do esforço computacional. Observa-se que a redução percentual será maior se forem empregados arranjos fatoriais fracionados ou completos.

O caso apresentado demonstra que a aplicação da BS pode ser bastante simplificada com o emprego de uma metodologia estruturada. Visando a expansão do emprego da técnica, a Metodologia GURI precisa ser testada em modelos com múltiplas variáveis.

É relevante registrar que está em andamento uma pesquisa que pretende empregar a BS para avaliação da relevância das variáveis de entrada de um sistema de manufatura que, posteriormente será otimizado com o emprego da simulação a eventos discretos.

Agradecimentos

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

Referências bibliográficas

- Besseris, G.J.** (2012). Profiling effects in industrial data mining by non-parametric DOE methods: An application on screening checkweighing systems in packaging operations. *European Journal of Operational Research*, doi: 10.1016/j.ejor.2012.01.020.
- Bettonvil, B.; Kleijnen, J.C.;** (1996). Searching for important factors in simulation models with many factors: Sequential Bifurcation. *European Journal of Operational Research*, v.96, p.180–194;
- Baines, T.; Mason, S.; Siebers, P.; Ladbroke, J.;**(2004). Humans: the missing link in manufacturing simulation?. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v.12, p.515-526;

- Campolongo, F.; Braddock, R.;** (1999). The use of graph theory in the sensitivity analysis of the model output: a second order screening method. *Reliability Engineering and System Safety*, v.64, p. 1-12.
- Chwif, L.; Medina, A.C.;** Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações. São Paulo: Ed. dos Autores, 2ed, p.254, 2007.
- Dean, A.M.; Lewis, S.M.;** (2002). Comparison of group screening strategies for factorial experiments. *Computational Statistics e Data Analysis*, v.39, p. 287-297.
- Edwards, D.J.; Truong, D.H.Q.;**(2011). A comparison of designs for one-step screening and response surface estimation. *Quality and Reliability Engineering International*, v.27, p. 1009-1024.
- Eskandari, H.; Mahmoodi, E.; Fallah, H.; Geiger, C.D.;** (2011). Performance analysis of comercial simulation-based optimization packages: Optquest and Witness Optimizer. *In: Proceedings of the Winter Simulation Conference* , Phoenix, AZ, USA.
- Harrell, C.; Ghosh, B. K.; Bowden, R.;** Simulation using Promodel. Boston, McGraw-Hill, 3ed.,p. 603, 2000.
- Kleijnen, J.C.;** Design and Analysis of Simulation Experiments. Springer, p.218, 2008;
- Kleijnen, J.C.;** (2009). Sensitivity Analysis of Simulation Models. Discussion Paper. Tilburg University. Tilburg, Netherlands,2009;
- Kleijnen, J.C.; Pierreval, H.; Zhang, J.;** (2011). Methodology for determining the acceptability of system designs in uncertain environments. *European Journal of Operational Research*, v.209, p. 176 – 183;
- Law, A.M.;** (2006) How to build valid and credible simulation models. *In: Proceedings of the Winter Simulation Conference* , Monterrey, CA, USA.
- Law, A.M.; Kelton, W.D.;** Simulation modeling and analysis. New York, McGraw-Hill, 3ed, p.760, 2000.
- Magallanes, J.; Olivieri, A.C.;** (2010). The effect of factor screening interactions in Plackett-Burmann experimental designs. Comparison of Bayesian-Gibbs analysis and algorithms. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v.102, p. 8-14.
- Montgomery, D.C. ;** *Design and Analysis of Experiments..* New York: John Wiley & Sons, 6ed, 2005.
- Montevichi, 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: Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Washington, DC, USA.
- Montevichi, J.A.B.; Costa, R.F.S.; Leal, F.; Pinho, A.F.; Jesus, J.T. ;** (2009). Economic evaluation of the increase in production capacity of a high technology products manufacturing cell using discrete event simulation. *In: Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Austin, TX, USA.
- O’kane, J.F.; Spenceley, J.R.; Taylor, R.;** (2000). Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 107, p. 412-424.
- Sakurada, N.; Miyake, D.I.;** (2009). Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operação de serviços. *Revista Gestão e Produção*, v.16, n.1, p. 25-43.
- Sargent, R.;** (2004). Validation and verification of simulation models. *In: Proceedings of the Winter Simulation Conference* , Washington, DC, USA.
- Sharda, B.; Bury, S.B.;** (2011). Best practices for effective application of discrete event simulation in the process industries. *In: Proceedings of the Winter Simulation Conference* , Phoenix, AZ, USA.
- Shen, H.; Wan, H.;** (2009). Controlled sequential factorial design for simulation factor screening. *European Journal of Operational Research*, v.198, p. 511 -519.
- Siebers, P.O.; Macal, C.M.; Garnett, J.; Buxton, D.; Pidd, M.;** (2010). Discrete-event simulation is dead, long life agent-based simulation! *Journal of Simulation*, v.4, p. 204 -210.