

UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES COMBINADA A SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA REPRESENTAR O ELEMENTO HUMANO EM UMA CÉLULA DE MANUFATURA

Mona Liza Moura de Oliveira
monaoli@yahoo.com.br

José Arnaldo Barra Montevechi
montevechi@unifei.edu.br

Alexandre Ferreira de Pinho
pinho@unifei.edu.br

Tábata Fernandes Pereira
tabatafp@gmail.com

David Custódio de Sena
davidc.sena@gmail.com

Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá – MG

RESUMO

A simulação a eventos discretos (SED) tem sido amplamente utilizada na análise de sistemas. Entretanto, autores defendem a ideia de que esta simulação não representa corretamente o elemento humano, bem como os fatores que afetam a sua produtividade, muitas vezes superestimando os resultados. Já na Simulação Baseada em Agentes (SBA), os agentes são seres inteligentes, autônomos e proativos, características fortemente relacionadas ao comportamento do ser humano. Portanto, combinou-se em um modelo a SBA com a SED a fim de representar o elemento humano como um agente, sendo este submetido a um dos fatores que afetam seu desempenho, o ritmo circadiano. Após validação estatística do modelo construído, foi possível verificar que o modelo computacional que integra a simulação baseada em agentes com a simulação a eventos discretos representa com um alto nível de confiança a célula em análise. Fez-se ainda a comparação deste modelo com um modelo computacional considerando a simulação a eventos discretos e verificou-se que neste caso os resultados da SED são estatisticamente maiores que o da SBA superestimando a capacidade da célula.

PALAVRAS CHAVE. Simulação Baseada em Agentes, Ritmo circadiano, Simulação a eventos discretos.

ABSTRACT

The discrete event simulation (DES) has been widely used in systems analysis. However, authors defend the idea that this simulation does not properly represent the human element and the factors that affect their productivity, often overestimating the results. In the Simulation-Based Agents (ABS), the agents are intelligent, autonomous and proactive, closely related features to human behavior. Therefore a model of ABS combined with the DES was built in order to represent the human element as an agent, which is subjected to one of the factors that affect performance, the circadian rhythm. After statistical validation of the constructed model, it was found that the computational model that integrates simulation based on agents with discrete event simulation is with a high level of confidence in the cell analysis. It also did the comparison of this model with a computer simulation model considering discrete event and it was found that in this case the DES results are statistically higher than the SBA overestimating the capacity of the cell.

KEYWORDS. Agent Based Simulation. Circadian Rhythm. Discrete Event Simulation.

1. Introdução

Os sistemas de manufatura são constituídos de muitas operações discretas que ocorrem aleatoriamente e de forma não linear, fazendo com que muitas vezes modelos matemáticos ou outros métodos não sejam práticos (O'KANE, SPENCELEY E TAYLOR, 2000). A simulação computacional pode ser definida como o processo de desenvolvimento de um modelo de um sistema real ou hipotético, a fim de conduzir experimentos para entender o comportamento deste sistema (NEGAHBAN e YILMAZ, 2014).

Segundo Melão e Pidd (2006), a simulação a eventos discretos, amplamente utilizada desde 1990, implica na construção de modelos computacionais de simulação que imitam um processo, de modo a explorar cenários e projetos alternativos. Na simulação a eventos discretos, o modelador considera o sistema sendo modelado como um processo, ou seja, uma sequência de operações, sendo realizadas através das entidades (BORSHCHEV, 2013).

Entretanto, de acordo com Dubiel e Tsimhoni (2005), existem certas situações que são difíceis de modelar utilizando somente a simulação a eventos discretos. Segundo os mesmos autores, o modelador deve fazer suposições muito precisas sobre as decisões do elemento humano, a fim de adequar o seu comportamento no formato de modelagem da simulação a eventos discretos. As decisões em tempo real de entidades individuais seriam muito difíceis de modelar utilizando este tipo de simulação.

Para Baines *et al.* (2004), a simulação computacional frequentemente superestima a capacidade de produção de sistemas de manufatura e esta diferença entre a performance prevista e a real se deve ao fato dos modelos de simulação não incorporarem elementos-chaves como o desempenho do ser humano e os fatores que impactam neste desempenho. A maioria dos *softwares* de simulação representa em grande número de detalhes o comportamento de máquinas, mas considera os trabalhadores como simples recursos (SIEBERS, 2006).

Chan, Son e Macal (2010) afirmam que a simulação baseada em agentes é diferente da clássica simulação a eventos discretos por causa da natureza dos agentes, uma vez que na Simulação Baseada em Agentes (SBA) os mesmos são proativos, autônomos e inteligentes. Para Siebers *et al.* (2010) a SBA auxilia no melhor entedimento de sistemas do mundo real, onde a representação ou modelagem de pessoas é importante e os indivíduos têm comportamentos autônomos. Segundo Zhao, Zhang e Qiu (2012), o comportamento humano pode ser representado adequadamente através do uso de agentes e sistemas multi-agentes.

De acordo com Dubiel e Tsimhoni (2005), através da combinação da simulação a eventos discretos e da simulação baseada em agentes, é possível modelar aspectos do sistema que não poderiam ser simuladas por qualquer um destes métodos de simulação separadamente. Já para Baines *et al.* (2004), para melhorar a precisão da simulação é necessário representar, de forma realista as pessoas, bem como seu comportamento e desempenho.

Será possível então aproveitar-se das vantagens oferecidas pela combinação da simulação a eventos discretos com a baseada em agentes para representar o elemento humano e fatores que afetam seu desempenho, a fim de tornar o resultado da simulação mais próximo à realidade, evitando superestimar a capacidade do processo?

Para sanar esta dúvida, o presente trabalho tem como objetivo construir um modelo de simulação baseada em agentes combinada a simulação a eventos discretos de uma determinada célula de manufatura, onde cada funcionário será representado por um agente. Estes agentes serão suscetíveis a um dos fatores que afetam o desempenho humano, o ritmo circadiano, e ainda terão autonomia para tomada de decisão. Os resultados de produtividade deste modelo computacional serão comparados com o sistema real, através de teste estatístico, a fim de verificar se o mesmo representa o comportamento da célula em questão. Um modelo computacional de simulação a eventos discretos da mesma célula também será construído, a fim de se realizar comparações estatísticas entre os modelos destes dois tipos de simulação.

O presente artigo se desenvolve adotando a seguinte estrutura: fundamentação teórica, onde são apresentadas as principais referências sobre o tema; o método de pesquisa adotado; a aplicação deste método; a análise dos principais resultados; a conclusão final do trabalho, bem como os agradecimentos, e por fim as referências utilizadas.

2. Fundamentação teórica

2.1 Simulação a eventos discretos

Para Banks (2000), a simulação é uma metodologia de resolução de problemas indispensável para a solução de muitos problemas do mundo real, uma vez que pode ser utilizada para descrever e analisar o comportamento de um sistema. Segundo Melão e Pidd (2006), a simulação a eventos discretos implica na construção de modelos computacionais de simulação que imitam um processo, de modo a explorar cenários e projetos alternativos.

A simulação computacional pode ser definida como a representação virtual de um sistema da vida real através de um modelo, tornando possível o estudo do sistema sem que seja necessário construí-lo na realidade, ou mesmo fazer modificações nesse sistema, e estudar os resultados dessas modificações, sem que haja necessidade de alterá-lo previamente (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2000).

De acordo com Montevechi *et al.* (2007), a simulação é a importação da realidade para um ambiente controlado, onde seu comportamento pode ser estudado sob diversas condições, sem riscos físicos e/ou altos custos envolvidos. Para Giannasi, Lovett e Godwin (2001), a simulação representa um modelo dinâmico de aspectos selecionados de um mundo real ou de um sistema imaginado. Esta não resolve por si mesma os problemas relacionados ao sistema, mas oferece resultados e saídas que podem ser usados na resolução destes problemas.

Entretanto, Dubiel e Tsimhoni (2005) afirmam que existem certas situações que são difíceis de modelar, utilizando a simulação a eventos discretos. Segundo os mesmos autores, o modelador deve fazer suposições muito precisas sobre as decisões do elemento humano, a fim de adequar o seu comportamento no formato de modelagem da simulação a eventos discretos. Segundo Baines *et al.* (2005), é preciso representar as pessoas de forma realista, considerando seu comportamento e desempenho, a fim de melhorar a exatidão da simulação.

2.2 Simulação Baseada em Agentes

De acordo com Macal e North (2009), a Simulação Baseada em Agentes pode ser considerada um novo paradigma de modelagem para a próxima geração de projetos de sistemas de manufatura, pois permite inserir elevado grau de individualização, autonomia e iteratividade aos agentes considerados no sistema modelado. Segundo Sakurada e Miyake (2009) os modelos baseados nestes agentes permitem que as entidades tenham a habilidade de detectar particularidades do ambiente, interagir com outros agentes, e escolher um curso de ação.

Para Chan, Son e Macal (2010), a simulação baseada em agentes difere-se da clássica simulação a eventos discretos (SED), devido à natureza dos agentes. Para estes autores, na SBA os agentes são proativos, autônomos e inteligentes, podendo iniciar ações, comunicar com outros agentes e tomar decisões por conta própria. Já na SED as entidades são simples, reativas e com capacidades limitadas.

Dubiel e Tsimhoni (2005) afirmam que a simulação baseada em agentes tem sido utilizada para modelar diferentes situações como evolução social, segregação, propagação de doenças, efetividade de propagandas e também na simulação de indústrias ao longo das últimas décadas. Já Leitão (2009) afirma que a SBA tem sido aplicada em diversas áreas como comércio eletrônico, negócios, controle de tráfego aéreo, controle de processos, telecomunicações, além de aplicações na manufatura.

Siebers *et al.* (2010) destacam em quais situações a Simulação Baseada em Agentes é aplicável:

- Quando o objetivo é modelar o comportamento de indivíduos em uma população variada;
- Quando os agentes têm relacionamento com outros agentes, principalmente relações dinâmicas, como por exemplo, contato estruturado e redes sociais;
- Quando é importante que os agentes individuais tenham aspectos espaciais ou geo espaciais para seu comportamento;
- Quando é importante que os agentes ou populações aprendam ou se adaptem;
- Quando os agentes se envolvem em um comportamento estratégico e precisam antecipar

- reações de outros agentes para tomar decisões;
- Quando é importante modelar agentes que cooperam, conspiram, ou formam organizações;
- Quando o passado não é um indicador do futuro, como por exemplo, novos mercados que atualmente não existem;
- Quando o aumento de escala é importante para níveis arbitrários, isto é, capacidade de extensão;
- Quando mudanças estruturais do processo precisam ser resultados do modelo ao invés de entrada.

Para Samuelson e Macal (2006), uma das principais razões da expansão da SBA é que os pacotes de *softwares* lançados nos últimos anos tornaram a modelagem baseada em agentes fácil o suficiente para atrair praticantes de simulação de diversas áreas. Para estes autores, os principais *softwares* deste tipo de simulação são *Swarm*®, *Repast*®, *NetLogo*®, *AnyLogic*®, *MASON*® e *Ascape*®.

Segundo Emrich, Suslov e Judex (2007), o *AnyLogic* é um ambiente de programação e simulação que auxilia principalmente na modelagem de sistemas híbridos, baseado em linguagem JAVA. Ainda segundo estes autores, este *software* permite que o usuário combine diferentes técnicas e abordagens como equações diferenciais, simulação baseada em agentes e a eventos discretos, se tornando uma ferramenta interessante para simulação de sistemas complexos.

2.3 Agentes

Para Grigoryev (2012) existe uma discussão acadêmica quando se tenta definir quais propriedades um objeto deve ter para ser chamado de agente. Entretanto, o mesmo autor apresenta alguns fatos que podem auxiliar nessa discussão:

- Agentes não necessariamente vivem em um espaço discreto, já que em muitos modelos o espaço pode não existir.
- Agentes não necessariamente são pessoas. Podem ser veículos, peças de equipamentos, projetos, ideias, organizações ou até mesmo um investimento;
- Um objeto que pareça ser um objeto absolutamente passivo pode ser um agente;
- Podem existir muitos ou poucos agentes em um modelo baseado em agentes;
- Existem modelos baseados em agentes onde os agentes não interagem.

Agente é a unidade do modelo que tem comportamento, memória, calendário, contatos, etc. E podem representar pessoas, companhias, projetos, ativos, veículos, cidades, animais, navios, produtos, entre outros elementos (DONG, LIU e LU, 2012).

Para Leitão (2009), o agente é um componente autônomo que representa objetos físicos ou lógicos, capaz de agir para alcançar seus objetivos e ainda interagir com outros agentes quando não possui conhecimento ou habilidade para alcançar sozinho estes objetivos. Ainda segundo este autor, as propriedades mais importantes de um agente são: autonomia, inteligência, adaptação e cooperação.

A principal característica de um agente é a capacidade de tomar decisões independentes. Um agente é um indivíduo discreto com um conjunto de características e regras, governando seu comportamento e sua capacidade de tomar decisões (SAMUELSON e MACAL, 2006). Segundo North e Macal (2007), o agente é um indivíduo com um conjunto de atributos e características comportamentais, sendo que os atributos definem o que dado agente é, enquanto que as características comportamentais definem o que um dado agente faz.

Para melhor representar o elemento humano no modelo computacional a ser desenvolvido no presente artigo, torna-se necessário atribuir aos agentes fatores comportamentais que afetem o seu desempenho ao longo do dia. Na seleção de modelos que representem o comportamento do desempenho humano, devem-se considerar os seguintes critérios: o modelo deve ser válido, ter literatura suficiente que indique que o fator representado poderia estar presente no contexto da manufatura e os dados de entrada sejam de fácil obtenção (BAINES *et*

al., 2004). Portanto, com base nestes critérios, escolheu-se a equação de Spencer (1987) para representar a influência do ritmo circadiano no desempenho do ser humano.

2.4 Ritmo circadiano

Os seres humanos são criaturas que estão suscetíveis a uma queda de performance e um aumento de sonolência para que repousem no momento apropriado. Como consequência, os seres humanos se sentem e se desempenham de forma diferente de um período do dia ao outro. Estas mudanças são chamadas de ritmos circadianos psicológicos e são movidas pelo marca-passo circadiano endógeno (MONK *et al.*, 1997).

De acordo com Marquie e Foret (1999), todos os ritmos desenvolvem tarefas vitais de bio-regulação, permitindo ao corpo manter níveis normais de motivação, esforço, saúde mental e física. Quando estes ritmos são interrompidos, o desempenho é degradado e a saúde pode ser afetada. O ritmo circadiano varia em um período de 24 horas, enquanto outros ritmos podem variar num período de semanas, meses ou anos. A principal função do ritmo circadiano é preparar a pessoa para dormir através da regulação hormonal das mais básicas funções do corpo humano (MONK, 1982).

Spencer (1987) realizou um experimento para analisar a variação da performance do ser humano ao longo do dia, devido a influência do ritmo circadiano. Baseado nos resultados de seu experimento, o autor desenvolveu uma equação que relaciona a hora do dia com o tempo em que a pessoa está acordada até aquele momento, para prever o desempenho dos operadores em diferentes períodos do dia. Assim, o referido autor observou que a produtividade percentual média na realização de um trabalho é representada pelo *Digit Symbol Substitution Task* (DSST):

$$DSST(T, t) = 233,3 + 1,54t - 0,304t^2 + 0,0108t^3 + 4,97 \cos(2\pi(T - 17,05) / 24) \quad (1)$$

Em que, T e t são medidos em horas e T representa a hora do dia e t o tempo transcorrido desde o acordar até o momento T. O gráfico na Figura 1 ilustra o percentual de produtividade de um trabalhador ao longo do dia, considerando que um trabalhador acorde às cinco horas e comece o seu turno de trabalho às oito horas.

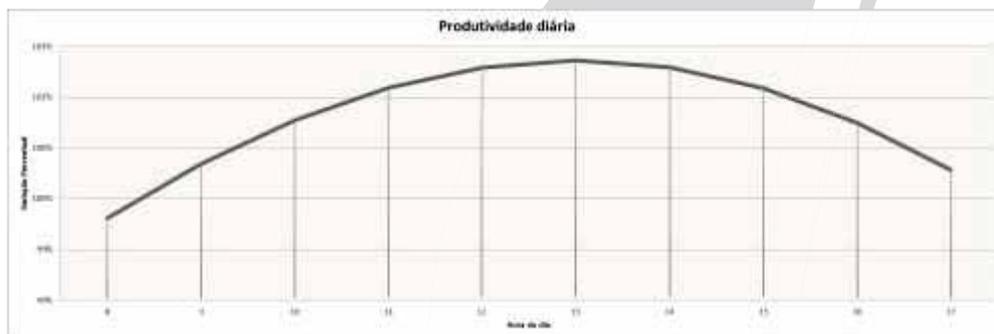


Figura 1 - Gráfico da Taxa de produtividade relacionado à hora do dia

Assim, percebe-se que, de acordo com a equação desenvolvida por Spencer (1987), o funcionário que acorda às cinco horas e trabalha das oito às dezessete horas, com um intervalo compreendido entre doze e treze horas, terá um rendimento maior aproximadamente às treze horas, e um rendimento menor nas extremidades, principalmente no começo do expediente.

3. Método de Pesquisa: Modelagem e simulação

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), a simulação deve ser usada quando se deseja prever o efeito de mudanças no sistema ou avaliar seu desempenho ou comportamento. É utilizada na resolução de problemas reais, durante o gerenciamento de operações, que envolve processos de projeto, planejamento, controle e operação, seja em indústrias de manufatura ou de

serviços.

Estes mesmos autores dividem as metodologias de pesquisa para modelagens quantitativas em duas classes: pesquisas Axiomáticas e pesquisas Empíricas. Nas pesquisas axiomáticas a preocupação primária do pesquisador é obter soluções dentro do modelo definido. A pesquisa axiomática produz conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis neste modelo, enquanto que na pesquisa empírica a preocupação primária do pesquisador é assegurar que existe um modelo ajustado entre as observações e as ações da realidade.

Em metodologias de pesquisas envolvendo a simulação, tem-se, também, o modelo de pesquisa desenvolvido por Mitroff *et al.* (1974), mostrado na Figura 2.

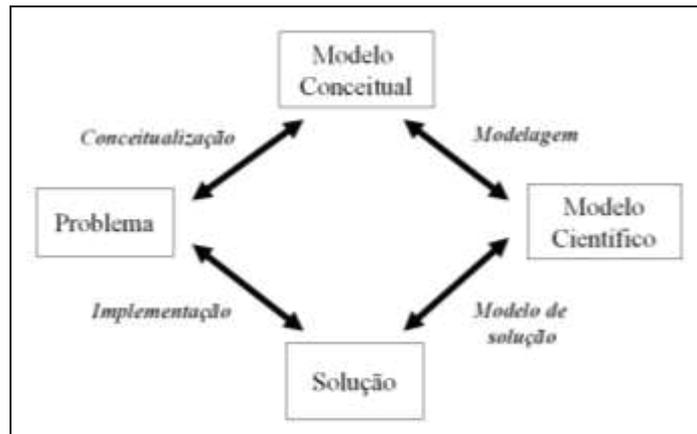


Figura 2 - Passos para a realização de Modelagem e Simulação
 Fonte: Adaptado de Mitroff *et al.* (1974)

Na etapa da conceitualização, o pesquisador desenvolve um modelo conceitual do problema a ser estudado. Definem-se, nesta fase, as variáveis relevantes do problema. Na fase de modelagem, constrói-se um modelo quantitativo que define as relações causais entre as variáveis selecionadas na primeira etapa. Na fase de modelo de solução, utiliza-se um modelo de resolução de processos, através de regras matemáticas. E finalmente, na fase de implementação, os resultados do modelo são aplicados.

Adicionalmente, Bertrand e Fransoo (2002) afirmam que nas pesquisas Axiomáticas Descritivas, os pesquisadores não passam pela fase de resolução de problemas. Nas Axiomáticas Normativas, os pesquisadores desenvolvem a modelagem e o modelo de solução. Nas Empíricas Descritivas, os pesquisadores desenvolvem a conceitualização, modelagem e a validação. E finalmente nas Empíricas Normativas, todo o ciclo é desenvolvido, sendo a mais completa das pesquisas.

De acordo com o que foi citado anteriormente, pode-se afirmar que a metodologia de pesquisa utilizada neste projeto é a Empírica Descritiva. Optou-se por esta metodologia, pois este trabalho preocupa-se em gerar uma contribuição acadêmica no conhecimento com relação à simulação baseada em agentes em conjunto com a simulação a eventos discretos na representação do elemento humano.

4. Aplicação do método

4.1 Definição e modelagem conceitual do sistema

O sistema a ser simulado consiste em uma célula de manufatura de uma empresa de alta tecnologia. O produto manufaturado nesta célula representa cerca de 40% do faturamento da empresa. A célula trabalha em um único turno das 8h às 17h, com uma hora de almoço e 30 minutos para café, distribuídos em intervalos ao longo do turno. Existem dois operadores disponíveis para montar o produto em questão e as atividades realizadas por estes operadores são totalmente manuais.

Na Figura 3, tem-se o modelo conceitual do sistema, construído através da utilização da

técnica de modelagem IDEF-SIM.

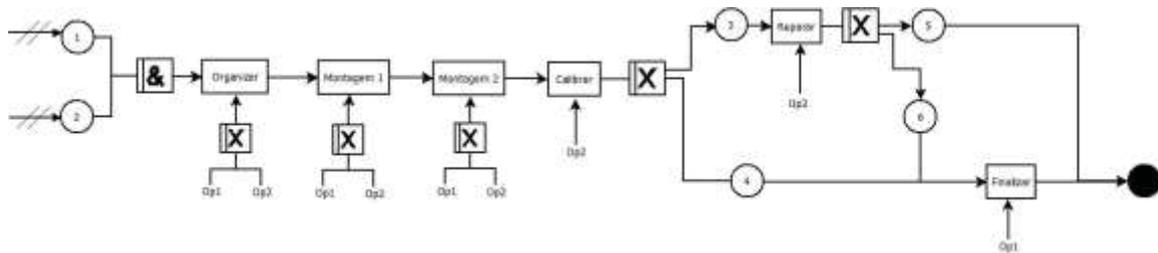


Figura 3: Modelo conceitual do sistema em IDEF-SIM

De acordo com a Figura 3, as matérias-primas chegam ao sistema e são levadas pelo operador 1 ou 2 até a atividade organizar. O operador 1 ou 2 organiza esses materiais na bancada e em seguida os componentes são montados pelo operador 1 ou 2. A seguir, ocorre uma soldagem realizada pelo operador 1 ou 2, resultando no produto montado. Este produto é ajustado e calibrado somente pelo operador 2, utilizando os equipamentos necessários. Neste ponto do processo, um produto montado pode seguir para a atividade finalizar, onde será acrescentada a blindagem, ou para atividade consertar, caso apresente defeito. Se necessitar de reparo, este reparo será feito pelo operador 2 e então o produto voltará para o fluxo normal, ou seja, seguirá para atividade finalizar. Caso não seja possível o conserto, este seguirá para o fornecedor, deixando o sistema. Por fim, após ser finalizado, o produto é levado pelo operador 1 ou 2 para a célula de controle de qualidade (saída do sistema).

4.2 Modelagem computacional

Nesta etapa do ciclo de Modelagem e Simulação foram construídos dois modelos computacionais. Um modelo combinando a SBA e a SED para representar os funcionários da célula como agentes. O outro é um modelo desta mesma célula em estudo, mas utilizou-se a simulação a eventos discretos, onde os funcionários são representados por recursos.

Para a prática de simulação a eventos discretos (SED) e simulação baseada em agentes (SBA), é necessária a modelagem do sistema em um ambiente computacional para agilizar a execução das atividades. O *software* utilizado foi o *Anylogic*®, uma vez que este *software* permite a construção de modelos que integrem a simulação baseada em agentes com a simulação a eventos discretos.

Cabe ressaltar que o objetivo da construção do modelo de integração da SBA com SED é representar o elemento humano, através de agentes suscetíveis a fatores que afetam o desempenho humano, neste caso especificamente, o ritmo circadiano, a fim de melhor representar o recurso humano e seu comportamento. Cabe lembrar ainda que cada funcionário representado pelo agente poderá tomar a decisão da hora em que irá acordar, variável importante no cálculo da equação do ritmo circadiano.

Conforme apresentado na revisão de literatura, o ritmo circadiano afeta diretamente o ser humano, impactando a sua performance e conseqüente a sua produtividade. De acordo com a equação de Spencer (1987), a variação da performance deve ser calculada a cada hora, considerando as variáveis “hora em que a pessoa acorda” e a “diferença entre a hora em análise e a hora que a pessoa acorda”.

Para este modelo computacional, a cada hora do dia, a variação de performance de cada agente é calculada e esta variação é então multiplicada pelo tempo de duração da atividade, penalizando ou acrescentando este tempo, de acordo com o resultado da equação. Vale ressaltar que o tempo utilizado no modelo foi o tempo médio de cada atividade, dado fornecido pela própria empresa.

Com relação à tomada de decisão dos agentes no que diz respeito à hora de acordar, tem-se no modelo um parâmetro que representa a hora que o trabalhador irá despertar, variável utilizada na equação (1). O valor desta variável encontra-se dentro de uma distribuição uniforme discreta entre 5 e 7 horas. A escolha destes valores justifica-se pelo horário que os funcionários

da célula geralmente despertam.

Conforme apontado anteriormente, construiu-se também um modelo computacional da célula, utilizando-se a simulação a eventos discretos, a fim de realizar futuras comparações entre os dois modelos. A grande diferença na construção destes modelos está na forma de representação do elemento humano. No modelo construído em SED, os operadores executam uma tarefa, considerando uma distribuição de tempos obtida através da cronometragem das atividades, dentro de um período de seis meses. Já no modelo de SBA combinada a SED, os funcionários são representados por agentes, sendo estes afetados pelo efeito do ritmo circadiano ao longo do dia.

Uma vez finalizado os modelos computacionais, os mesmos foram rodados por oito vezes, a fim de representar os oito meses de acompanhamento real da célula de manufatura em questão.

4.3 Análise dos resultados

O objetivo principal do desenvolvimento do artigo era, através da combinação da simulação a eventos discretos com a simulação baseada em agentes, melhor representar o elemento humano na simulação, considerando sua autonomia para tomadas de decisão e seu desempenho afetado pelo ritmo circadiano. Tornou-se necessário então validar este modelo computacional desenvolvido para verificar se o mesmo representa o comportamento do sistema real.

Segundo Sargent (2013), uma das formas de se validar o modelo computacional é através da validação de dados históricos. Para o referido autor, se os dados históricos existem, parte destes dados pode ser usada para construir o modelo e o restante usados para determinar se o modelo se comporta como o sistema. Para validação do modelo, considerou-se a variável de saída “peças mensais produzidas”.

Os dados gerados pelo modelo computacional relacionados à produtividade mensal foram comparados aos dados reais coletados da célula, considerando um horizonte de oito meses. Como o número de dados coletados no sistema real se restringe a apenas oito, relativos aos oito meses de acompanhamento da célula, não se tem base suficiente para afirmar que os dados representam uma distribuição normal.

Este fato não prejudica a análise estatística dos dados, uma vez que, de acordo com Montgomery e Runger (2003), quando a distribuição em estudo não é caracterizada como normal, métodos não paramétricos como teste *Mann-Whitney U*, podem ser utilizados. Ainda segundo os autores, este teste compara duas amostras independentes, onde a hipótese nula é testada para verificar se as médias das duas amostras são iguais. Já a hipótese alternativa está relacionada a não igualdade das médias.

Ainda como objetivo do artigo, tem-se a comparação dos resultados do modelo de integração da SBA com SED com os resultados de um modelo de simulação a eventos discretos da mesma célula em estudo, considerando as diferentes formas de representação de fator humano. Portanto, além da validação estatística, realizaram-se também comparações estatísticas entre estes modelos.

- **Teste 1: Validação estatística dos modelos:**

Realizou-se o teste não paramétrico *Mann-Whitney U* para os dados do estudo, comparando-se os dados do sistema real com os dados do Modelo 1 (SBA+SED). Para este teste, a hipótese nula (H_0) é que as amostras são estatisticamente iguais e a hipótese alternativa (H_1) que estas amostras não são iguais. De acordo com os resultados do teste representado na Tabela 1, têm-se que se deve aceitar a hipótese nula.

Pode-se então afirmar com 95% de confiança que as duas amostras, real e simulada, são consideradas estatisticamente iguais, ou seja, pode-se considerar que o modelo computacional construído representa o comportamento da célula em questão. O mesmo teste foi feito com o modelo de SED e este também foi considerado validado.

- **Teste 2: Comparação entre os dois modelos:**

Primeiramente, utilizou-se do teste não paramétrico *Mann-Whitney U* para verificar se os resultados dos dois modelos são iguais estatisticamente. Para este teste, tem-se que a hipótese nula (H_0) as amostras são iguais e hipótese alternativa (H_1) que as amostras não são iguais. Conforme resultado descrito na Tabela 1, tem-se que se deve aceitar a hipótese alternativa, ou seja, as amostras não são estatisticamente iguais.

Realizou-se então outro teste para verificar se os resultados da SED são estatisticamente maiores que os da SBA combinada a SED. A escolha deste teste justifica-se pela afirmação de Baines *et al.* (2004) que diz que a simulação a eventos discretos superestima os resultados por não representar corretamente o fator humano. O teste escolhido foi novamente o *Mann-Whitney U* e para este teste tem-se como hipótese nula (H_0) que as amostras são estatisticamente iguais. Já na hipótese alternativa (H_1) tem-se que amostra 1 (neste caso SED) é maior que amostra 2 (SBA+SED). Verificou-se, conforme apresentado na Tabela 1, que se deve aceitar H_1 , ou seja, os resultados do modelo de SED são maiores que os do modelo da integração da SBA com SED.

Tabela 1 - Resultados dos testes estatísticos

	Sistema Real = SED	Sistema Real = SBA+SED	SED = SBA+SED	SED > SBA+SED
Parâmetro de Teste	0,1036	0,439	0,0009	0,0005

Com base nestes resultados, pode-se dizer que a combinação das técnicas SBA e SED representa a realidade da célula em questão, uma vez que a o modelo foi validado estatisticamente. Já com relação à comparação dos modelos, tem-se que apesar de ambos estarem validados, a SED apresenta valores de resultados mais elevados, confirmando para este caso em questão, a afirmação de Baines *et al.* (2004) que SED superestima os resultados.

Outro ponto a ser destacado na comparação entre os modelos é a construção dos mesmos. Para o modelo de SBA combinado à SED, foi necessário informar ao modelo o valor médio dos tempos de execução das tarefas e o próprio modelo calculava para cada hora do dia se o tempo seria acrescido ou decrescido, conforme a equação de produtividade do ritmo circadiano. Já para alimentar os dados do modelo de SED, como não se tinha abertura para inserir equações de desempenho nos recursos, foi necessária a coleta de tempos por um período de seis meses, a fim de se encontrar uma distribuição estatística adequada para cada atividade.

Pode-se dizer que o modelo de SBA combinado a SED apresenta uma vantagem com relação ao desenvolvimento, uma vez que para construção deste modelo de integração não foi necessária uma intensa cronometragem que normalmente dispense um grande período de tempo de coleta de dados para encontrar a melhor distribuição estatística.

5. Conclusão

De acordo com alguns autores, a simulação a eventos discretos por si só não representa corretamente o fator humano, bem como as características que afetam a sua produtividade, por representar o elemento humano como simples recursos. Já a simulação baseada em agentes torna possível representar o recurso humano como agentes autônomos, inteligentes e proativos, características fortemente relacionadas ao comportamento do elemento humano.

A fim de verificar se a simulação baseada em agentes é uma possível solução para esta lacuna de representação do fator humano na simulação a eventos discretos, construiu-se um modelo de uma determinada célula de manufatura combinando a SBA com a SED. Representaram-se os operadores no modelo como agentes e assim foi possível inserir uma das características do fator humano que afetam a sua produtividade, o ritmo circadiano.

Os agentes por natureza são tomadores de decisão e neste modelo cada agente decidia dentro de uma distribuição de probabilidade qual a hora que iria acordar, conferindo a cada operador um biorritmo diferente, tornando possível a análise estocástica do efeito do ritmo circadiano na produtividade.

Foi realizado um teste de hipóteses não paramétrico para verificar se os dados de

produtividade gerados no modelo computacional são estatisticamente iguais aos dados reais coletados. Dentro de um horizonte de oito meses, foi possível verificar que as amostras são estatisticamente iguais, ou seja, o modelo computacional que integra a SBA e SED representa o comportamento da célula em questão.

A fim de realizar ainda novas comparações, construiu-se um modelo de simulação a eventos discretos da mesma célula em questão. Verificou-se através de testes não paramétricos que os resultados dos modelos de SBA combinado a SED e resultados da SED não são estatisticamente iguais e ainda que o modelo de SED apresentou valores de produtividade mais elevados que os do modelo de SBA com SED, endossando a afirmação de alguns autores que a SED superestima resultados.

Cabe ressaltar no que diz respeito ao desenvolvimento dos modelos, que a SBA combinada a SED apresenta vantagem com relação à simulação a eventos discretos, uma vez que não foi necessária uma intensa cronometragem dos dados das atividades, sendo que com a média destes tempos e o ritmo circadiano foi possível validar o modelo computacional.

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se a escolha de outros fatores que possam afetar a produtividade humana, como por exemplo, idade dos funcionários, temperatura do ambiente, entre outras, para verificar se estes fatores auxiliam na melhor representação do elemento humano na simulação.

Agradecimentos:

Os autores gostariam de agradecer os órgãos de fomento Capes, Fapemig e CNPq.

Referências

- Baines T. S., Asch R., Hadfield L., Mason J. P., Fletcher S., Kay J. M.** (2005), Towards a theoretical framework for human performance modeling within manufacturing systems design, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13:486–504.
- Baines T. S., Mason S., Siebers P. O., Ladbroke J.** (2004), Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modelling Practice and Theory*, 12: 515–526.
- Banks J.** (2000), Introduction to simulation. In: Winter Simulation Conference, Atlanta, 9-16.
- Bertrand J. W. M., Fransoo J. C.** (2002), Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2): 241-264.
- Borshchev, A.**, *The Big Book of Simulation Modeling*, AnyLogic North America, 2013.
- Chan W. K. V., Son Y. J., Macal C. M.** (2010), Agent-Based Simulation Tutorial Simulation of Emergent Behavior And Differences Between Agent-Based Simulation And Discrete-Event Simulation. In: Winter Simulation Conference, 135-150.
- Dong F., Liu H., Lu B.** (2012), Agent-based Simulation Model of Single Point Inventory System, *Systems Engineering Procedia*, 4: 298 – 304.
- Dubiel B., Tsimhoni O.** (2005), Integrating Agent Based Modeling into a Discrete Event Simulation. In: Winter Simulation Conference, 1029-1037.
- Emrich S., Suslov S., Judex F.** (2007), Fully Agent Based Modellings Of Epidemic Spread Using Anylogic, In: EUROSIM, 1-7.
- Giannasi F., Lovett P., Godwin A. N.** (2001), Enhancing confidence in discrete event simulations. *Computers in Industry*, 44:141-157.
- Grigoryev I.** (2012), *AnyLogic 6 in three days: a quick course in simulation modeling*. Hampton, NJ: AnyLogic North America.
- Harrell C., Ghosh B. K., Bowden R.**, *Simulation Using Promodel*. 3. ed., Boston: McGraw-Hill, 2000.
- Leitão P.** (2009), Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22: 979–991.
- Macal C. M., North M. J.** (2009), Agent-Based Modeling And Simulation. In: Winter Simulation Conference, 87-98.
- Marquie J. C., Foret J.** (1999). Sleep, age and shiftwork experience. *European Sleep Research Society*, 8:297-304.

- Melão N., Pidd M.** (2006), Using component technology to develop a simulation library for business process modeling. *European Journal of Operational Research*, 172: 163–178.
- Mitroff I. I., Betz F., Pondy L. R., Sagasti F.** (1974), On managing science in the system age: two schemas for the study of science as a whole system phenomenon. *Interfaces*, 4 (3): 46-58.
- Monk T. H., Buysse D. J., Reynolds C. F., Berga S. L., Jarret D. B., Begley A. E., Kupfer D. J.** (1997), Circadian rhythms in human performance and mood under constant conditions. *European Sleep Research Society*, 6:9-18.
- Monk T. H., Leng V. C.** (1982), Time of day effects in simple repetitive tasks: some possible mechanisms. *Acta Psychologica*, 51:207–221
- 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, Washington, DC, USA.
- Montgomery D. C., Runger G. C.** (2003), *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 2th ed. Ed. LTC.
- Negahban A., Yilmaz L.** (2014), Agent-based simulation applications in marketing research: an integrated review. *Journal of Simulation*, 8:129–142.
- North M. J., Macal, C. M.**, *Managing Business Complexity*, Oxford University Press, New York, 2007.
- 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*, 107: 412-424.
- Sakurada, N.; Miyake, D. I.** (2009), Simulação Baseada em Agentes (SBA) para modelagem de sistemas de operações. In: XII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, *Anais...* 1-16.
- Samuelson D. A., Macal C. M.** (2006), Agent-Based Simulation Comes of Age: Software opens up many new areas of application, *OR/MS Today*, (<http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-8-06/agent.html>, acessado em 03 Janeiro de 2015.
- Sargent R G.** (2013), Verification and Validation of simulation models. *Journal of Simulation* 7(1):12-24
- Siebers P. O.** (2006), *Worker Performance Modeling in Manufacturing Systems Simulation*. Chapter in J-P. Rennard (Eds.) *Handbook of Research on Nature. Inspired Computing for Economy and Management*. Pennsylvania: Idea Group Publishing, 2006.
- Siebers P. O., Macal C. M., Garnett J., Buxton D., Pidd M.** (2010), Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! *Journal of Simulation*, 4: 204–210.
- Spencer M. B.** (1987), The influence of irregularity of rest and activity on performance: a model based on time sleep and time of day. *Ergonomics*, 30(9): 1275-1286.
- Zhao C., Zhang X., Qiu J.** (2012), Modelling and Simulation on Collaborative Work in Cellular Manufacturing, In: International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 730-733.