SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS: UM MODELO COM ENTIDADES AUTÔNOMAS

João Paulo Barbieri
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG
j.p.barbieri@hotmail.com

Alexandre Ferreira Pinho
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG
pinho@unifei.edu.br

Mona Liza Moura de Oliveira
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG
monaoli@yahoo.com.br

José Arnaldo Barra Montevechi
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Av. BPS, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG
montevechi@unifei.edu.br

RESUMO

A Simulação a Eventos Discretos (SED), uma das abordagens mais tradicionais da Pesquisa Operacional, é muito utilizada na área de manufatura. Todavia, nos modelos de SED o fator humano é frequentemente representado como simples recursos e a sua dinâmica comportamental é negligenciada. Isso ocorre, uma vez que modelar e simular o comportamento humano ainda é um desafio tradicional no campo da simulação, devido aos complexos princípios que governam as ações humanas. De modo a contribuir cientificamente no campo da representação do fator humano em modelos computacionais, o presente artigo baseia-se em conceitos da Inteligência Artificial (IA) para elaborar um modelo de SED cujas entidades são autônomas. Através da metodologia de modelagem e simulação, as entidades foram criadas e possuem características autônomas e tomam a decisão de aumentar, manter ou diminuir o seu ritmo de trabalho com base na meta diária estabelecida.

PALAVRAS-CHAVES. Simulação a Eventos Discretos, Entidade Autônoma, Inteligência Artificial.

Eixo temático (Simulação)

ABSTRACT

Discrete Event Simulation (DES), one of the most traditional approaches to Operational Research, is widely used in manufacturing. However, in the DES models, the human factor is often represented as simple resources and its behavioral dynamics is neglected. This is because modeling and simulating human behavior is still a traditional challenge in the field of simulation because of the complex principles that govern human actions. In order to contribute scientifically in the field of the representation of the human factor in computational models, the present article is based on concepts of Artificial Intelligence (AI) to elaborate a model of DES whose entities are autonomous. Through the methodology of modeling and simulation, entities were created and they have autonomous characteristics and make the decision to increase, maintain or decrease their work rate based on the established daily goal.

KEYWORDS. Discrete Event Simulation, Autonomous Entity, Artificial Intelligence.

Topic (Simulation)

https://proceedings.science/p/107016?lang=pt-br

1. Introdução

Apesar do progresso da tecnologia e o seu impacto nos sistemas produtivos, o fator humano continua sendo uma das peças fundamentais desses sistemas. O comportamento humano é o cerne de diversas pesquisas, principalmente nos campos científicos da psicologia e da sociologia, que exercem influência em áreas como Modelagem e Simulação.

Sendo uma das ferramentas de análise mais poderosas, a simulação é um método que auxilia na concepção, planejamento, análise e otimização de sistemas de manufatura [Shannon 1975; Schönemann et al. 2015]. Há diversos tipos de abordagem de simulação, porém a abordagem mais utilizada para analisar e compreender a dinâmica dos sistemas de manufatura é a Simulação a Eventos Discretos [Negahban e Smith 2014]. De modo específico, pesquisas como as de [Hannah e Neal 2014], [Nembhard 2014], [Perez et al. 2014], [Silva et al. 2014], [Robinson 2015], [Dode et al. 2016], [Malachowski e Korytkowski 2016], [Neumann e Medbo 2017] e [Shewchuk et al. 2017] relacionam a Simulação a Eventos Discretos (SED) e o Fator Humano (FH).

O aumento progressivo do tamanho e da complexidade dos sistemas reais vem desafiando a modelagem e a simulação de tais sistemas através da SED [Cicirelli et al. 2011]. Na literatura são diversas as críticas voltadas para a SED e o FH. No campo da modelagem e simulação de sistemas de manufatura, [Baines e Kay 2002], [Baines et al. 2004] e [Digiesi et al. 2009] trazem argumentos suficientes indicando que elemento humano presente nos sistemas de manufatura é representado como simples recurso por meio da SED. Ademais, tais pesquisadores ainda afirmam que o comportamento dinâmico do elemento humano é normalmente negligenciado.

[Bruzzone et al. 2007] admitem que o comportamento humano ainda é um desafio tradicional para a própria área de simulação e sua aplicação nas áreas de negócio. Portanto, o objetivo central dessa pesquisa consiste em desenvolver e analisar um modelo de SED cujas entidades têm aspectos autônomos dentro de um arranjo produtivo em linha. A autonomia dessas entidades está relacionada à tomada de decisão em aumentar ou diminuir o ritmo de trabalho em função de uma meta produtiva variável ao longo do tempo. A construção desse modelo de SED com entidades autônomas baseia-se em conceitos da Inteligência Artificial (IA).

2. Simulação a Eventos Discretos e a Inteligência Artificial

No âmbito conceitual, a SED é uma técnica de simulação utilizada para modelar sistemas que sofrem modificações ao longo do tempo. Devido às variáveis de estado presentes nesses sistemas, tais mudanças ocorrem em pontos distintos no tempo, dando origem aos eventos. Os eventos são acontecimentos instantâneos que possuem a capacidade de alterar o estado atual do sistema [Law 2007]. Assim, a SED possibilita reproduzir os acontecimentos dinâmicos de um determinado sistema real [Ingalls 2008].

Há a expectativa de que um modelo de SED seja satisfatoriamente próximo da realidade e consiga representar as variáveis aleatórias pertencentes ao sistema real. Essa representação das variáveis aleatórias ocorre por meio da modelagem dos dados de entrada que, por sua vez, dá origem às distribuições de probabilidade que possibilitam, por exemplo, realizar inferências acerca das propriedades de uma determinada variável aleatória do sistema real [Chwif e Medina 2015].

A abordagem de modelagem aplicada na construção de modelos de SED é a *top-down*, ou seja, de cima para baixo. Isso significa que na SED o foco está em modelar os macro processos de um sistema e não os micro processos, como é o caso do comportamento das entidades. Desse modo, o comportamento macro do sistema em estudo é modelado e suas entidades possuem características passivas [Siebers et al. 2010].

De acordo com [Kasaie e Kelton 2015], identificar e conceitualizar a estrutura dos comportamentos e interações humanas é um problema comum na modelagem de sistemas complexos envolvendo o FH. Segundo [Brailsford et al. 2012] também é comum a ausência de similaridade entre os resultados dos sofisticados e complexos modelos de simulação e os resultados dos sistemas reais. Conforme os mesmos autores, essa ausência de similaridade ocorre porque os modelos de simulação não consideram o comportamento humano. Para [Elkosantini 2015] outro ponto crítico é o uso frequente de dados determinísticos para representar o comportamento humano nos modelos. Isso explica a margem de erro entre os resultados da simulação e a realidade.

Nos modelos de SED, a inclusão do desempenho humano gera oportunidade de conhecimento quanto ao impacto e a importância do fator humano no sistema [Baines et al. 2004]. Contudo, o elemento humano é ainda considerado como simples recurso na abordagem de SED e frequentemente o seu comportamento dinâmico é negligenciado [Digiesi et al. 2009]. Nesse cenário, os conceitos que dão sustentação à ciência da IA podem servir de base para o desenvolvimento de entidades inteligentes dentro de modelos de SED.

As definições de IA são abundantes na literatura. [Bellman 1978] afirma que a IA é o ato de associar o pensamento humano à automatização das atividades humanas. Segundo [Haugeland 1985], a IA é um esforço em desenvolver máquinas que pensam. Para os pesquisadores [Charniak e McDermott 1985] a IA é uma ciência que estuda as faculdades mentais através de modelos computacionais. Conforme [Winston 1992], a IA baseia-se no estudo aplicado da percepção, do raciocínio e da ação humana por meio dos instrumentos computacionais. Em resumo, pode-se definir a IA como a ciência que estuda as faculdades mentais do ser humano e a materialização dessas faculdades mentais através do aparato robótico e computacional.

Na IA, o elemento que possui características inteligentes é chamado de agente. Um agente possui a idiossincrasia de perceber através de sensores o ambiente no qual está inserido e agir dentro desse ambiente através de atuadores [Russel e Norvig 2003]. A Figura 2.1 mostra a estrutura de um agente.

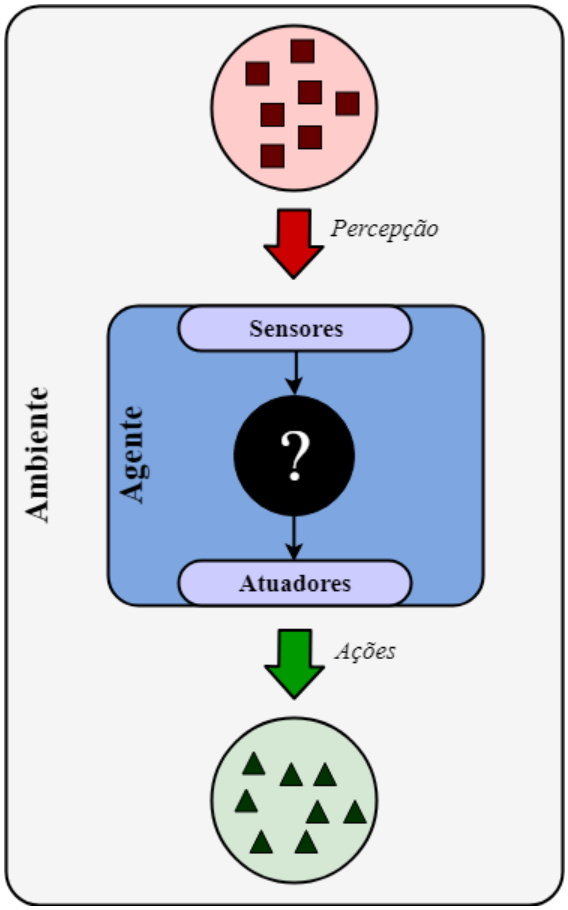


Figura 2.1 - Estrutura de um agente.
Fonte: Adaptado de [Russel e Norvig 2003].

Na IA, um agente possui autonomia quando o mesmo age no ambiente com base em suas percepções e não em um conhecimento prévio do projetista [Russel e Norvig 2003]. Para os mesmos autores, o conceito de percepção está relacionado com as entradas perceptivas (sensores) do agente em qualquer ponto no tempo. Uma vez que as informações são processadas com base

nas faculdades mentais do agente, uma decisão é tomada e transformada em ação dentro do ambiente por intermédio dos atuadores.

3. Método de pesquisa

Para conduzir uma pesquisa de cunho quantitativo na área de engenharia de produção e gestão de operações, os seguintes métodos de pesquisa são os mais apropriados: Pesquisa de Avaliação (*Survey*), Modelagem e Simulação, Experimento, e Quase-experimento [Martins 2012]. Por conta da proposta em desenvolver um modelo computacional com entidades autônomas, o método de pesquisa mais adequado para essa pesquisa é o método da Modelagem e Simulação.

Dentro do contexto da Pesquisa Operacional, o método de Modelagem e Simulação auxilia na construção de modelos que têm por finalidade representar e solucionar problemas de caráter complexo em sistemas reais. Esses modelos são de natureza quantitativa e procuram absorver as principais características presentes no sistema real [Bertrand e Fransoo 2002; Chwif e Medina 2015].

Representado pela Figura 3.1, o modelo simples e holístico proposto por [Mitroff et al. 1974] é composto por quatro elementos que orientam o pesquisador na criação de modelos quantitativos na área de Pesquisa Operacional. O modelo fundamenta-se nos elementos (I) Realidade, situação do problema, (II) Modelo Conceitual, (III) Modelo Científico e (IV) Solução. As transições que conectam esses elementos baseiam-se nas atividades de conceitualização, modelagem, validação, construção do modelo de solução, feedback e implementação.

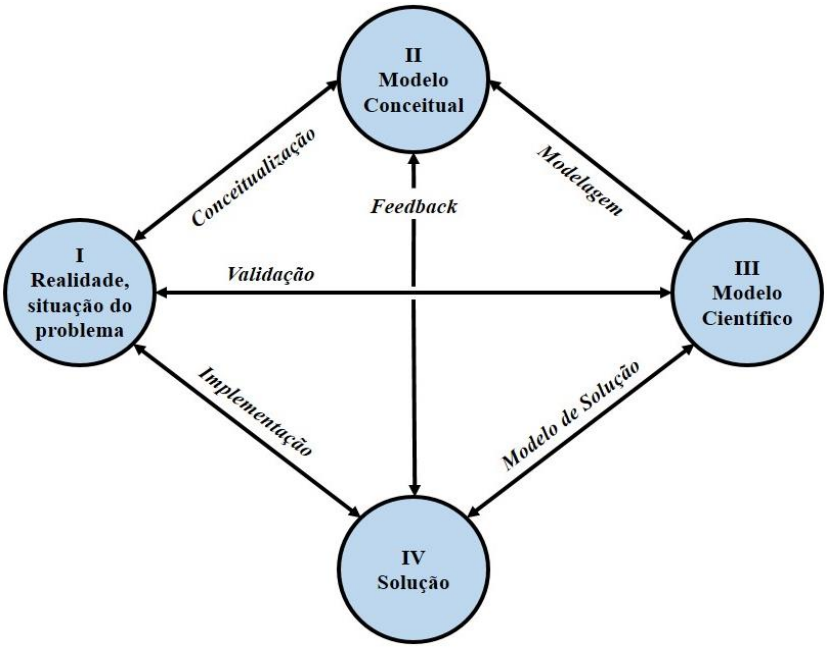


Figura 3.1 - A visão sistêmica da resolução de problemas.
Fonte: Adaptado de [Mitroff et al. 1974].

Há dois tipos específicos de pesquisa baseada em modelos quantitativos na área de Modelagem e Simulação. O primeiro tipo recebe o nome de pesquisa axiomática quantitativa e o segundo tipo é denominado pesquisa empírica quantitativa. Esses dois tipos de pesquisa ainda são classificados em duas categorias: descritiva e normativa [Bertrand e Fransoo 2002; Morabito Neto e Pureza 2012]. Nesse artigo a pesquisa empírica descritiva será adotada, pois será desenvolvido um modelo computacional com a capacidade de descrever as relações causais que existem em um sistema de manufatura. Essa pesquisa empírica descritiva seguirá o ciclo de "conceitualização – modelagem" de acordo com o modelo de [Mitroff et al. 1974]. Portanto, um modelo científico será o resultado desse artigo.

As etapas para a construção de um modelo de SED com entidades autônomas ocorreram

de modo independente e complementar. Dois modelos conceituais foram criados. O primeiro representando a linha produtiva e o segundo retratando o comportamento autônomo das entidades. Em seguida, dois modelos computacionais foram criados de forma a reproduzir e unir os elementos presentes nos modelos conceituais. Por fim, dados sobre o comportamento autônomo das entidades foram coletados e analisados.

4. Experimentos computacionais

4.1 Construção dos modelos conceituais e computacionais

Para o desenvolvimento deste artigo que visa analisar as entidades autônomas em um sistema produtivo, foi construído um modelo conceitual de uma linha de manufatura. A Figura 4.1 mostra a linha de manufatura composta por três postos de trabalho e seus respectivos operadores. A técnica utilizada na construção do modelo conceitual foi o *Integrated Definition Methods - Simulation* (IDEF-SIM) [Leal 2008].

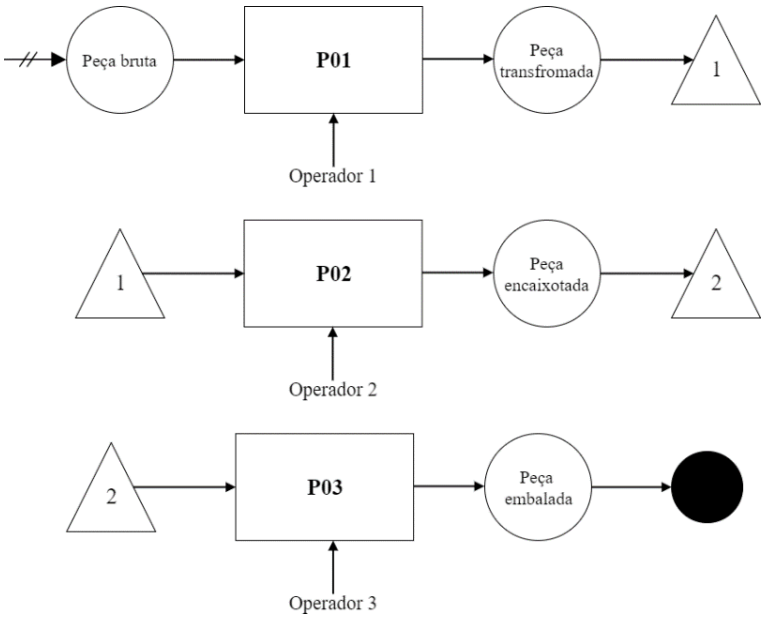


Figura 4.1 - Modelo Conceitual da linha de manufatura.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Em evidência na Figura 4.1, estão os três operadores do processo em linha. No modelo de SED, cada operador é considerado como uma entidade que possui um comportamento autônomo no qual existe uma relação direta quanto ao ritmo de trabalho desempenhado no decorrer de oito horas de trabalho. A Tabela 4.1 mostra o horário de trabalho seguido pelas entidades autônomas.

Tabela 4.1 - Horário de trabalho dos operadores

Início	Fim	Estado
17:00	08:00	“Descansando”
08:00	12:00	“Trabalhando”
12:00	13:00	“Almoçando”
13:00	17:00	“Trabalhando”

Além dos estados descritos na Tabela 4.1, cada entidade possui outros estados em função da alteração do seu ritmo de trabalho. Portanto, as entidades, durante o estado “Trabalhando”, podem estar no estado de ritmo “Normal”, “Rápido” ou “Lento”. É importante salientar que uma entidade pode estar em um estado de ritmo diferente do estado de ritmo de outra entidade em um mesmo momento. Ou seja, o Operador 1 pode estar no estado de ritmo “Lento” enquanto o Operador 2 pode estar no estado de ritmo “Rápido”. A Figura 4.2 representa o modelo conceitual de cada entidade.

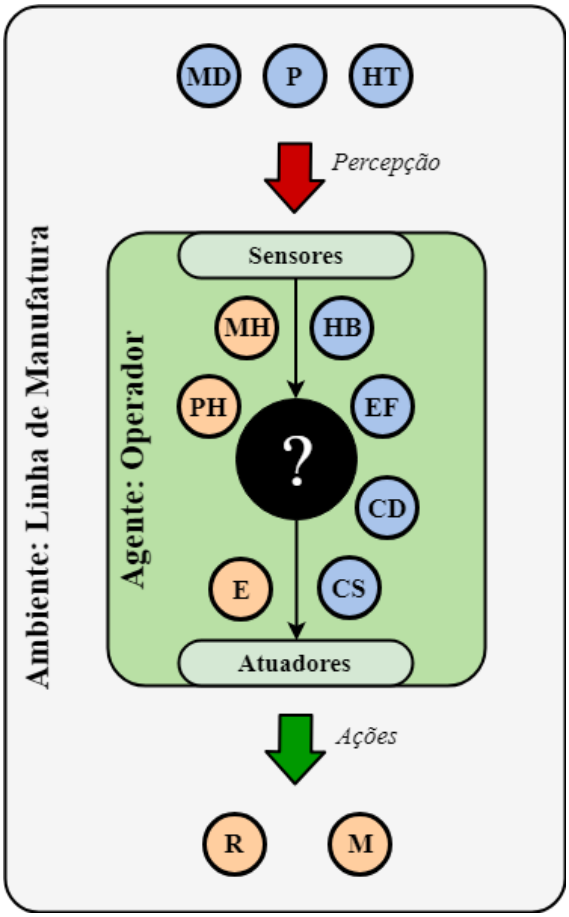


Figura 4.2 - Modelo Conceitual de cada entidade.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Na Figura 4.2, cada entidade coleta a quantidade de Produção (P), quantas Horas Trabalhadas (HT) até o momento e a Meta Diária (MD). Com essas informações, cada entidade calcula quanto foi produzido durante uma hora e qual deveria ser a Meta Horária (MH). Ao comparar a Produção Horária (PH) com a MD, a entidade identifica o valor individual de sua Eficiência (E). De acordo com o valor E, a entidade altera de modo aleatório os valores Habilidade (HB), Esforço (EF), Condições (CD) e Consistência (CS). Os valores HB, EF, CD e CS baseiam-se no Sistema Westinghouse para avaliação do ritmo [Barnes 1977]. Portanto, com base no valor E, a entidade decide se deve aumentar, manter ou diminuir o seu Ritmo (R) de trabalho, evidenciando o valor R através de seu Movimento (M).

4.3. Análise do comportamento autônomo das entidades

Baseando-se em conceitos de inteligência artificial, o presente artigo busca analisar um modelo de SED cujas entidades têm aspectos autônomos dentro de um arranjo produtivo em linha. Nesse modelo de SED existem três postos de trabalho que são representados por distribuições estocásticas de probabilidade e, em cada posto de trabalho, existem operadores que são retratados com entidades autônomas.

Como visto anteriormente, cada operador modifica o seu próprio ritmo de trabalho com base em uma meta diária de produção. O operador observa quantas horas de trabalho já se passaram, qual a produção até o momento e a meta do dia. Com essas informações, o operador compara dois dados: a meta horária desejada de produção e a produção que de fato ocorreu na última hora. Após essa comparação, o operador decide se deve manter, aumentar ou diminuir o seu ritmo de trabalho conforme o seu índice de eficiência. As Figuras 4.3 a 4.5 mostram a alteração do ritmo de trabalho de cada operador em função de sua eficiência durante oito horas de trabalho.

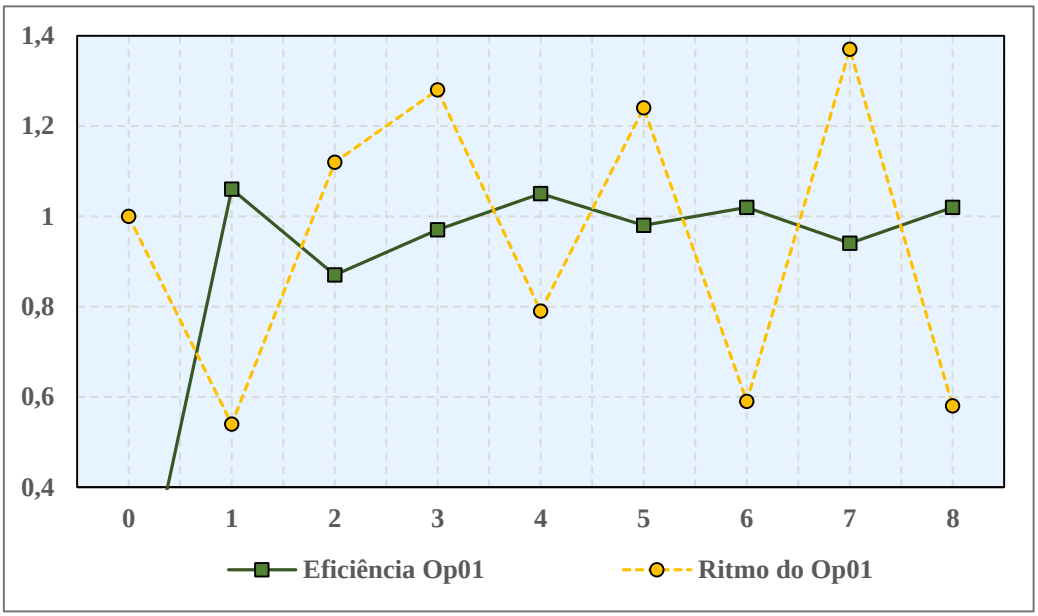


Figura 4.3 - Variação do ritmo de trabalho do Op01.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

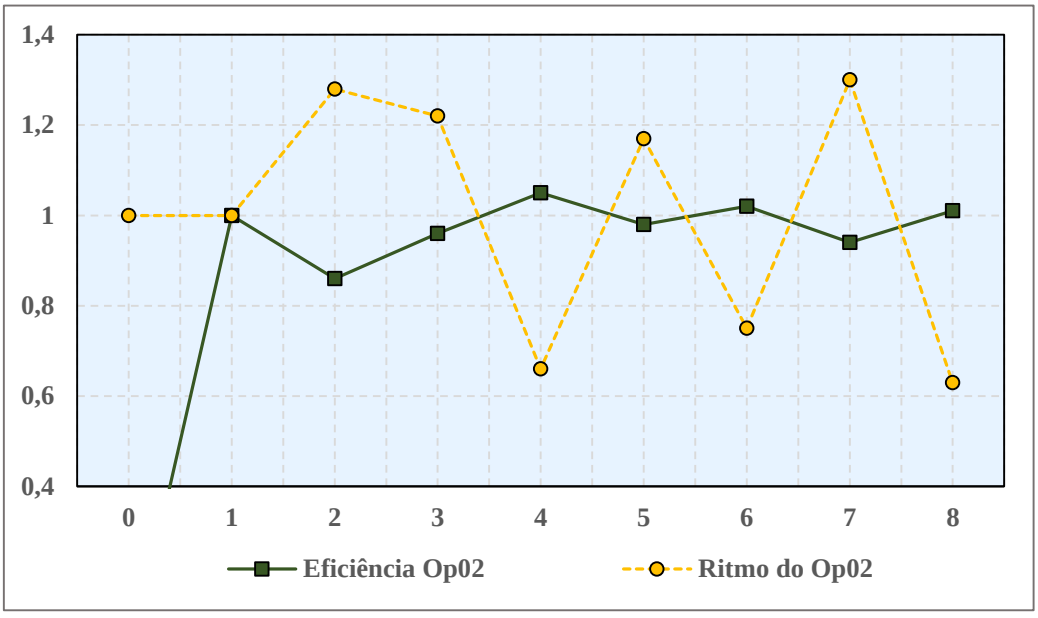


Figura 4.4 - Variação do ritmo de trabalho do Op02.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

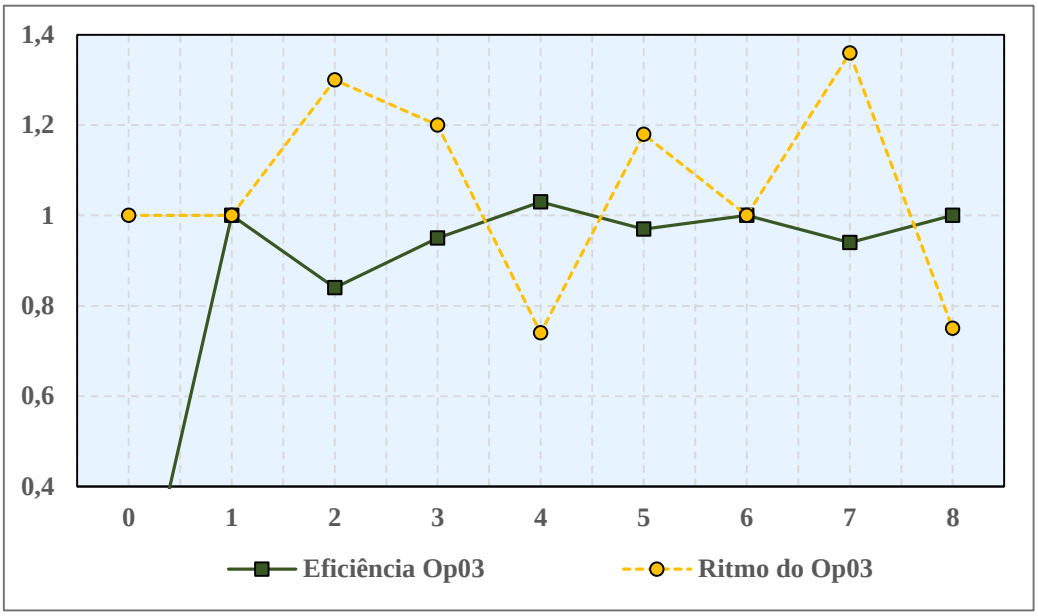


Figura 4.5 - Variação do ritmo de trabalho do Op03.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

Como mostrado nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, no decorrer da simulação os operadores se esforçam para controlar seus índices de eficiência através do ritmo de trabalho. Para efeito de esclarecimento, o eixo vertical representa os valores percentuais da eficiência e do ritmo, e o eixo horizontal representam as horas de trabalho. Portanto, se, na última hora de trabalho, foi produzido menos do que a meta horária, o operador aumenta o seu ritmo de trabalho para a próxima hora. Isso significa que durante as oito horas de trabalho os operadores buscam de maneira autônoma e individual alcançar a meta diária definida através do seu ritmo de trabalho.

Nesse ponto, é interessante realizar uma análise de sensibilidade para verificar se os operadores respondem a um eventual aumento da meta diária. Inicialmente, esse aumento ocorreu na ordem de 10%. Com esse aumento, nota-se que o ritmo dos operadores aumentou levemente. Esse efeito é pouco perceptível no gráfico e, por esse motivo, um segundo aumento ocorreu na ordem de 20%. As Figuras 4.6 a 4.8 retratam o efeito desse aumento.

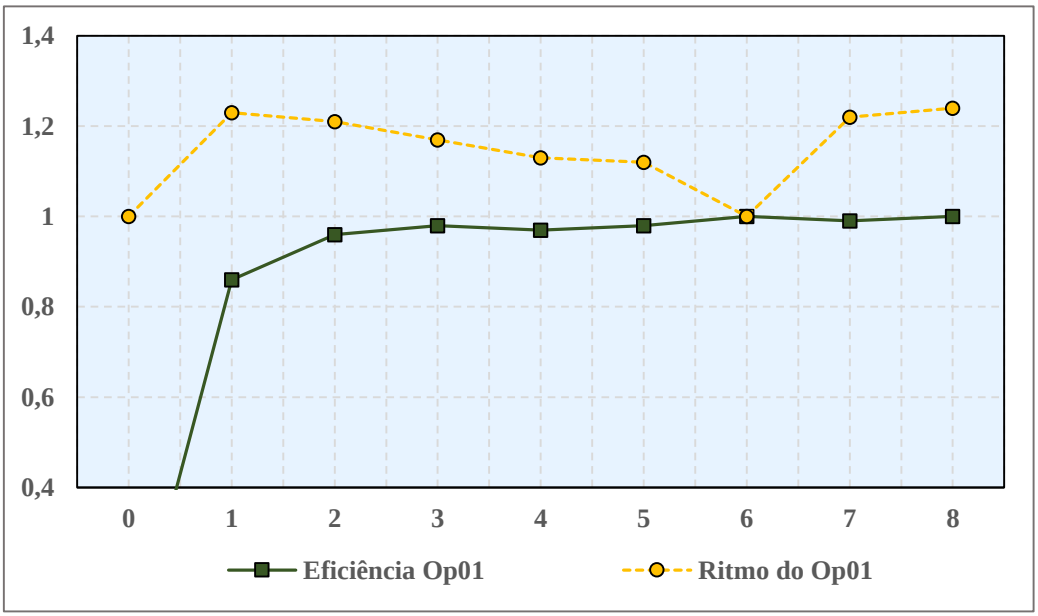


Figura 4.6 - Variação do ritmo de trabalho do Op01 após aumento de 20% da meta diária.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

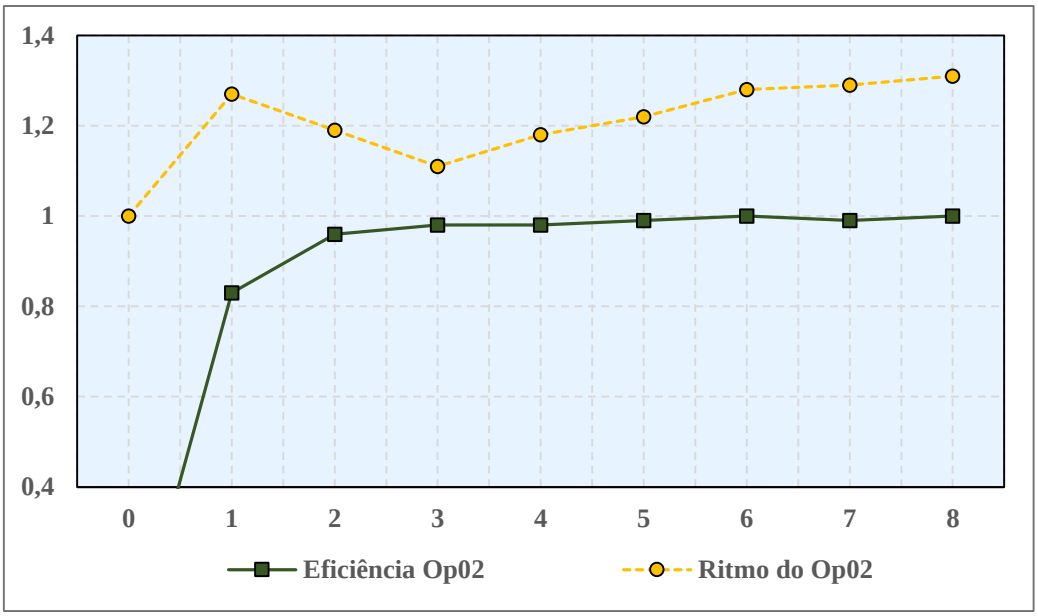


Figura 4.7 - Variação do ritmo de trabalho do Op02 após aumento de 20% da meta diária.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

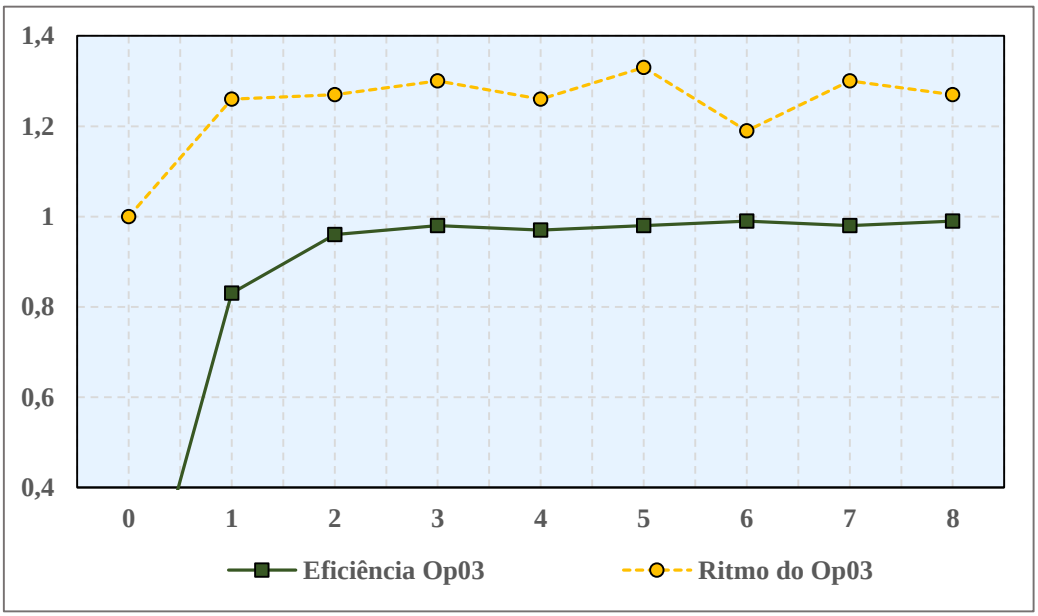


Figura 4.8 - Variação do ritmo de trabalho do Op03 após aumento de 20% da meta diária.
Fonte: Elaborado pelos próprios autores

As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 demonstram que ao aumentar a meta diária em 20% os operadores permanecem em um ritmo acelerado durante às oito horas de trabalho. Esse efeito que a modificação da meta diária tem sobre o ritmo de trabalho dos operadores deixa explícito que a entidade autônoma toma decisões ao absorver informações do ambiente simulado.

5. Conclusão

Em modelos de SED, como abordado anteriormente, o FH é geralmente retratado como simples recurso. Nota-se que nos modelos de SED que contêm o FH, o comportamento da entidade geralmente se encontra presente na distribuição de probabilidade que representa os tempos coletados de um determinado posto de trabalho. Em outras palavras, considera-se que a variabilidade do labor humano está implícita na distribuição de probabilidade.

Como citado anteriormente, existem na literatura científica diversas tentativas de representar o FH em modelos de SED. Ainda é um desafio representar o FH em modelos computacionais. Esse desafio permanece, pois a essência do FH é complexa e está em contínua mudança em virtude de aspectos internos e externos. Esse fato não impede a construção de modelos conceitual e computacional do FH, mesmo que esses modelos sejam parciais. São muitos os detalhes a serem considerados durante a modelagem do FH, e, portanto, é fundamental que o desenvolvedor do modelo delimite as características do FH a serem ressaltadas. Assim, mesmo de modo limitado, o FH pode ser representado, aproximando os resultados da simulação com os da realidade.

Nessa pesquisa, o modelo de SED foi construído pensando em atribuir às entidades aspectos autônomos dentro de um arranjo produtivo em linha. A autonomia das entidades foi materializada com base na literatura científica de IA. Também foi utilizado conceitos da área de estudo dos tempos e movimentos. Nesse modelo de SED, as entidades autônomas tomam a decisão de aumentar, manter ou diminuir o seu ritmo de trabalho com base na meta diária estabelecida. Através de uma análise de sensibilidade, nota-se que essas entidades autônomas se esforçam em manter o seu índice de eficiência por meio da alteração do ritmo de trabalho. Assim, o objetivo determinado no início desse artigo foi alcançado.

Existem melhorias que podem ser feitas nesse modelo de SED com entidades autônomas como, por exemplo, a inserção da variável fadiga. Essa variável poderia exercer o papel de restrição do ritmo de caráter acelerado e contínuo. Indo mais além, essas entidades autônomas poderiam ter um comportamento interativo e adaptativo de acordo com eventos que potencialmente podem acontecer com frequência em um ambiente de trabalho.

Agradecimentos

Os autores desse artigo gostariam de expressar gratidão à UNIFEI, CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio concedido ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Referências

Baines, T. S. e Kay, J. M. (2002). Human performance modelling as an aid in the process of manufacturing system design: a pilot study. *International Journal of Production Research*, v.40, n.10, pp.2321-2334.

Baines, T., Mason, S., Siebers, P. O. e Ladbrook, J. (2004). Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modelling Practice and Theory*, v.12, pp.515-526.

Barnes, R. M. (1977). Estudos de movimentos e de tempos: projetos e medidas do trabalho. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher.

Bellman, R. E. (1978). An introduction to artificial intelligence: can computers think? San Fracisco: Boyd & Fraser.

Bertrand, J. W. e Fransoo, J. C. (2002). Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v.22, n.2, pp.241-264.

Brailsford, S. C., Harper, P. R. e Sykes, J. (2012) Incorporating human behaviour in simulation models of screening for breast cancer. *European Journal of Operational Research*, v.219, pp.491-507.

Bruzzone, A. G., Briano, E., Bocca, E. e Massei, M. (2007). Evaluation of the impact of different human factor models on industrial and business processes. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v.5, pp.199-218.

Charniak, E. e McDermott, D. (1985). Introduction to Artificial Intelligence. Massachusetts: Addison-Wesley.

Chwif, L. e Medina, A. C. (2015) Modelagem e Simulação de eventos discretos: teoria & aplicações. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.

Cicirelli, F., Furfaro, A. e Nigro, L. (2011). Modelling and simulation of complex manufacturing systems using statechart-based actors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v.19, pp.685-703.

Digiesi, S., Kock, A. A. A., Mummolo, G. e Rooda, J. E. (2009). The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. *International Journal of Production Economics*, v.120, pp.368-377.

Dode, P., Greig, M., Zolfaghari, S. e Neumann, W.P. (2016). Integrating human factors into discrete event simulation: a proactive approach to simultaneously design for system performance and employees' well-being. *International Journal of Production Research*, v.54, n.10, pp.3105-3117.

Elkosantini, S. (2015). Toward a new generic behavior model for human centered system simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v.52, pp.108-122.

Hannah, S. D. e Neal, A. (2014). On-the-fly scheduling as a manifestation of partial-order planning and dynamic task values. *Human Factors*, v.56, n.6, pp. 1093-1112.

Haugeland, J. (1985). Artificial Intelligence: The Very Idea. Massachusetts: MIT Press.

Ingalls, R. G. (2008). Introduction to simulation. In: *Winter Simulation Conference*, Proceedings... Miami, FL, USA.

Kasaie, P., Kelton, W. D. (2015). Guidelines for design and analysis in agent-based simulation studies. In: *Winter Simulation Conference*, Proceedings... Huntington Beach, CA, USA.

Law, A. M. (2007). Simulation Modeling & Analysis. 4. ed. NewYork: McGraw-Hill.

Leal, F. (2008). Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados. 2008. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

Macal, C. M. (2016). Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, v.10, n.02, pp.144-156.

Malachowski, B. e Korytkowski, P. (2016). Competence-based performance model of multi-skilled workers. *Computers and Industrial Engineering*, v.91, pp.165-177.

Martins, R. A. (2012). Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Org). Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, Cap.3, pp.47-63.

Mitroff, I. I., Betz, F., Pondy, L. R. e Sagasti, F. (1974). On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. Interfaces, v.4, n.3, pp.46-58.

Morabito Neto, R. e Pureza, V. (2012). Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Org). Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, Cap.8, pp.169-198.

Negahban, A. e Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, v.33, pp.241-261.

Nembhard, D. A. (2014) Cross training efficiency and flexibility with process change. *International Journal of Operations and Production Management*, v.34, n.11, pp.1417-1439.

Neumann, W.P. e Medbo, P. (2017). Simulating operator learning during production ramp-up in parallel vs serial flow production. *International Journal of Production Research*, v.55, n.3, pp.845-857.

Perez, J., de Looze, M. P., Bosch, T. e Neumann, W.P. (2014). Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v.44, n.2, pp.298-306.

Robinson, S. (2015). Modelling without queues: adapting discrete-event simulation for service operations. *Journal of Simulation*, v.9, n.3, pp.195-205.

Russel, S. e Norvig, P. (2003). Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall.

Silva, E., Donauer, M., Azevedo, A., Pecas, P. e Henriques, E. (2014). A case study evaluating the impact of human behaviour on a manufacturing process in-line with automatic processes by means of a simulation model. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, pp.145-149.

Schönemann, M., Herrmann, C., Greschke, P. e Thiede, S. (2015). Simulation of matrix-structure manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v.37, pp.104-112.

Shannon, R. E. (1975). Systems Simulation: the art and science. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Shewchuk, J. P., Nussbaum, M.A., Kim, S. e Sarkar, S. (2017). Simulation modeling and ergonomic assessment of complex multiworker physical processes. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, v.47, n.6, pp.777-788.

Siebers, P. O., Macal, C. M., Garnett, J., Buxton, D. e Pidd, M. (2010). Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! *Journal of Simulation*, v.4, n.3, pp.204-210.

Winston, P. H. (1992). Artificial Intelligence. 3. ed. Massachusetts: Addison-Wesley.