

# Complexidade de novos produtos: um modelo dinâmico para análise da perda de produtividade em sistemas produtivos

*The complexity of new products: a dynamic model for productivity loss analysis within productive systems*

Emerson Cleister Lima Muniz<sup>1</sup>   
Osmar Possamai<sup>2</sup>

**Como citar:** Muniz, E. C. L., & Possamai, O. (2019). Complexidade de novos produtos: um modelo dinâmico para análise da perda de produtividade em sistemas produtivos. *Gestão & Produção*, 26(1), e2372. <https://doi.org/10.1590/0104-530X2372-19>

**Resumo:** A globalização vem mudando constantemente as características do mercado consumidor no qual as empresas estão inseridas, bem como as necessidades de seus clientes. Deste modo, para se manterem competitivas dentro desse mercado, as empresas necessitam inserir em seus produtos determinadas características que acabam culminando com o aumento da complexidade deles. Tais complexidades podem gerar efeitos não desejados na produtividade da manufatura. De posse disto, um modelo de simulação dinâmica foi desenvolvido para verificar os efeitos que a complexidade de produtos pode causar na produtividade dos sistemas. Para isto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a complexidade e a complexidade de produtos, identificando, assim, tanto os elementos que as caracterizam como os efeitos que podem gerar na manufatura. Por meio de simulações, conclui-se que incrementos na complexidade dos produtos geram queda de 50% na produtividade e se a linha possuir restrições em sua capacidade, tais perdas ultrapassarão a marca dos 60%. Por fim, observa-se que uma análise prévia das alterações que o aumento da complexidade pode gerar no processo é uma ferramenta eficaz para reduzir perdas na produtividade, demonstrando, assim, que uma gestão eficiente da complexidade se faz necessária nos processos de desenvolvimento de produtos.

**Palavras-chave:** Complexidade; Complexidade de produtos; Produtividade.

**Abstract:** *Globalization has been constantly changing the consumer market characteristics in which companies are inserted, as well as their clients' necessities. Thus, to maintain competitiveness in this market, companies need to include certain features in their products which lead to an increase in the complexity of these products. These complexities may cause unwanted effects in manufacturing productivity. Knowing this, a dynamic simulation model was developed to verify the effects that product complexity may have on system productivity. For this, bibliographic research on complexity and product complexity has been done to identify not only the elements which characterize them but also the effects they may cause in manufacturing. Through simulations, it is concluded that increments in product complexity generate a 50% productivity loss, and if the line has restrictions in its capacity, these losses are more than 60%. Ultimately, previous analysis of the changes product complexity may cause in the process is an effective tool to reduce productivity loss, which is evidence that efficient management of complexity is necessary for the processes of product development.*

**Keywords:** *Complexity; Product complexity; Productivity.*

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Sergipe – UFS, Avenida Marechal Rondon, CEP 49100-000, São Cristóvão, SE, Brasil, e-mail: eng.prod.emerson@gmail.com

<sup>2</sup> Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil, e-mail: osmar.possamai@ufsc.br

Recebido em Ago. 31, 2017 - Aceito em Mar. 7, 2018

Suporte financeiro: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

## 1 Introdução

A globalização e o avanço tecnológico vêm tornando mais desafiador o cenário atual de mercado em que as organizações estão inseridas. Em conjunto com esses fatores, tem-se também a elevação do nível de exigência dos clientes, proporcionado pela maior quantidade de informação disponibilizadas, assim como um maior número de possibilidades de produtos ofertados (Gottfredson & Aspinall, 2005; Wang, 2010). Essas tendências têm obrigado as organizações a desenvolver produtos diferenciados e introduzi-los no mercado da forma mais rápida possível (Wang, 2010; Wang et al., 2011; Perona & Miragliotta, 2004). Deste modo, atualmente, o ato de desenvolver produtos é um dos grandes ganhos competitivos das empresas e está diretamente ligado aos anseios e às necessidades dos consumidores.

Nesse contexto, a complexidade de produtos é atualmente um dos principais desafios com que a gestão da manufatura tem de lidar, sobretudo no que se refere ao desempenho e à eficiência fabril. Deste modo, conhecer e compreender bem os elementos que influenciam essa complexidade é um ponto-chave para as empresas que projetam e lançam novos produtos no mercado. Logo, o gerenciamento da complexidade deve tornar-se o núcleo de capacidade superior e diferenciação das empresas que lidam com esta (Schleich & Schaffer, 2007; Badrous, 2011; Ramdas, 2003). De acordo com Perona & Miragliotta (2004), o controle e a gestão do nível crescente de complexidade devem ser considerados uma questão estratégica para as empresas, o que reforça ainda mais a importância e a necessidade de conhecer e detalhar a complexidade que permeia o ambiente produtivo.

Com isso, as empresas que forem capazes de gerenciar com sucesso o seu desenvolvimento de produtos, lidando de modo eficaz com a complexidade destes, despontarão na corrida por vantagem competitiva dentro do mercado consumidor (ElMaraghy et al., 2012). Entretanto, para um melhor gerenciamento dessa complexidade dentro dos sistemas e, consequentemente, um melhor desempenho fabril, primeiramente é necessário conhecer quais os efeitos que a complexidade de produtos pode causar na manufatura e em sua produtividade. Diante disso, este trabalho tem o objetivo de propor um modelo de simulação dinâmico para verificar os efeitos que o aumento ou a variação da complexidade de produtos pode causar na produtividade da manufatura ao longo do tempo.

### 1.1 Metodologia empregada na pesquisa

A pesquisa em questão fez uso do método indutivo, amparado por pesquisa exploratória do tema, que, por sua vez, permitiu orientar a identificação e a análise dos efeitos provenientes da complexidade do produto

nos sistemas produtivos. Para tornar mais explícito o problema de estudo, uma pesquisa bibliográfica foi realizada, gerando, assim, mais familiaridade com o problema de pesquisa. Essas investigações embasadas em publicações científicas da área correlata ao tema enfatizam ainda mais a caracterização de uma pesquisa de cunho exploratório (Lakatos & Marconi, 2007).

Ao se tratar da abordagem empregada no desenvolvimento do trabalho, pode ser caracterizada parcialmente como quantitativa, fato esse comumente utilizado dentro de pesquisas na área das ciências exatas, como a engenharia. Entretanto, a pesquisa também apresenta características qualitativas, ao se basear na interpretação subjetiva dos fatos, não sendo interpretada apenas por números, mas também por ferramentas lógicas e de observação.

Em relação aos passos empregados para o alcance do objetivo de pesquisa, uma pesquisa bibliográfica foi realizada, permitindo, assim, análise e identificação de conceitos, elementos e impactos referentes à complexidade de produto, que contribuíram para a estruturação e o desenvolvimento de diagramas causais que precederam o modelo proposto. Em sequência, ao empregar conceitos da dinâmica de sistemas e tendo como suporte de criação o *software* Vensim® PLE (versão 6.3), o modelo de simulação dinâmica e seus respectivos modelos de fluxo e estoques foram desenvolvidos. Com isso, um conjunto exaustivo de simulações foi realizado, buscando, assim, verificar os efeitos que os incrementos na complexidade de produtos podem gerar na manufatura.

## 2 Complexidade e suas definições

A complexidade vem sendo discutida na física, biologia, filosofia, engenharia, gestão, saúde, sociologia, entre outras áreas (Bozarth et al., 2009; Suh, 2003, 2005). Originária da palavra latina *complexus*, que significa “aquilo que é tecido junto” ou “entrelaçado”, a complexidade pode ser interpretada de vários modos. Badrous (2011), por exemplo, compreende a complexidade como um conjunto de elementos diferentes, porém relacionados, ou mesmo algo difícil de ser compreendido por suas diversas partes distintas e interligadas. Em contrapartida, Giovannini (2002) diz que pode ser entendida como algo que abrange muitos elementos ou partes, bem como um conjunto ou grupo de coisas que têm qualquer ligação ou nexos entre si.

No entanto, existem muitas tentativas para criar uma definição universalmente aceita do termo complexidade. Entretanto, essa definição única, geral e aceita universalmente ainda está em construção, pois é tão diversa quanto os autores que a desenvolveram, como Blecker et al. (2004), Jacobs (2007), Ramdas (2003), Schleich & Schaffer (2007), Wu et al. (2007), Lee (2003), Suh (2003) e Rodríguez-Toro et al. (2003).

Em consonância com essas afirmações, Morin (2010), Lee (2003) e Rodríguez-Toro et al. (2003) afirmam que não se pode chegar à complexidade por meio de uma definição prévia. É necessário seguir caminhos tão diversos, de tal modo que levem o pesquisador a se perguntar se existem “complexidades” e não somente uma “complexidade”.

Um ponto que merece discussão acerca da complexidade e suas inúmeras descrições reside no fato de diferenciá-la do termo complicado, não considerando esses dois termos palavras sinônimas. Essa afirmativa pode ser justificada com base nas discussões apresentadas por Suh (2003) e Perona & Miragliotta (2004), que convergem em seus pensamentos ao caracterizarem o complicado como um conjunto de partes ou elementos entrelaçados que podem ser analisados separadamente, visando à obtenção de uma solução pertinente para este.

Entretanto, a complexidade vai muito além de um conjunto de partes ou elementos entrelaçados que podem ser analisados separadamente. Com base nas afirmações já apresentadas por Morin (2005, 2010) e Wang (2010), pode ser compreendida como um sistema composto de diversos elementos entrelaçados, de tal modo que uma análise em separado desses elementos seja praticamente impossível.

## 2.1 Complexidade de produtos

O produto é o elo de ligação entre a empresa e é em torno dele e da dinâmica dessa relação que a manufatura pode sofrer consequências resultantes da complexidade envolvida nesse sistema de negócios. Diante disso, alguns conceitos, explicações e discussões acerca da complexidade de produtos podem ser obtidos na literatura. Os mais relevantes para este trabalho serão apresentados a seguir.

Alguns autores (Jacobs, 2007; Pasche, 2008; MacDuffie et al., 1996; Ramdas, 2003; Gupta & Krishnan, 1999; Closs et al., 2008; Suh, 2003; Lee, 2003; Schulz, 2008; Kaski & Heikkila, 2002; Rodríguez-Toro et al., 2003; Zhu et al., 2008) compreendem a complexidade de produtos, sob a análise de quatro elementos que a caracterizam, o número de componentes, a variedade de componentes, o número de interações e a quantidade de interações entre os componentes.

Para complementar, Jacobs & Swink (2011) elucidam que essa compreensão da complexidade de produtos pode também ser aplicada à análise da complexidade de outros sistemas, como o sistema de produção. Deste modo, adotam-se diversos produtos como componentes do sistema e os diversos tipos de interações que podem existir entre eles.

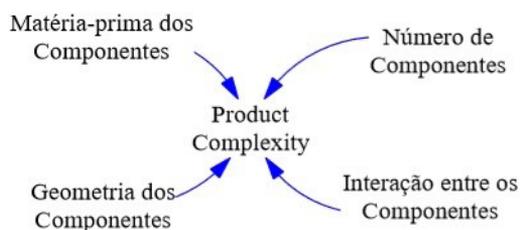
Por meio de uma visão mais voltada à estrutura em si do produto e como complemento da compreensão exposta no parágrafo anterior, autores como Bliss

(2000), ElMaraghy & Urbanic (2004), Suh (2003) e ElMaraghy et al. (2005, 2012) afirmam que a quantidade e os diversos tipos de materiais e geometrias que os componentes de um produto apresentam são características que podem influenciar também o aumento de sua complexidade, dado que podem ser considerados novos componentes a serem inseridos no produto.

Ainda nesse contexto, Hobday (1998) afirma que a complexidade de produtos pode ser caracterizada também com base no grau de inovação tecnológica e na variedade da base de conhecimento que as empresas possuem sobre o produto. Pautados ainda nessa visão, Kotteaku et al. (1995) salientam que essa complexidade pode ser proporcionada por quatro dimensões relacionadas, respectivamente, com a estrutura técnica do produto, sua diferenciação tecnológica, as instalações necessárias a seu desenvolvimento e os serviços de pós-venda.

Deste modo, tendo como base a discussão apresentada para fins desta pesquisa, a complexidade de produtos é caracterizada sob o olhar de quatro elementos principais, o número de componentes, o tipo de matéria-prima dos componentes, a geometria dos componentes e as interações entre os componentes, conforme exposto na Figura 1.

Quanto ao número de componentes, reforça-se que está atrelado à quantidade de componentes que um produto possui em sua estrutura, podendo estes ser idênticos ou não, mas já conhecidos e aplicados em processos dentro da produção, o que leva, então, a duas outras características da complexidade de produtos, a matéria-prima e a geometria dos componentes, responsáveis pela diversidade dos componentes dentro dos produtos. Dada a necessidade, por exemplo, em determinado produto, do emprego de componentes plásticos, metálicos, entre outros, assim como de itens que possam até possuir os mesmos tipos de materiais, são dotados de geometrias distintas que acabam implicando tamanhos, formas e dimensões variadas. Logo, podem ser compreendidas por características que permitam distinguir o produto, ao passo que podem ser considerados novos componentes a serem adotados na estrutura deste (ElMaraghy et al., 2012; Closs et al., 2008).



**Figura 1.** Elementos que caracterizam a complexidade de produtos. Fonte: O autor.

Por fim, as interações entre os componentes estão relacionadas com as ligações existentes entre componentes de um produto que, por sua vez, gera influências recíprocas, ou seja, trata-se da conexão existente entre dois ou mais componentes, sejam físicas, como conexões mecânicas, sejam pneumáticas, de informação, dada a necessidade de transferência de forças entre eles (ElMaraghy et al., 2005; Kaski & Heikkila, 2002).

## 2.2 Efeitos da complexidade de produtos na produtividade

Dentro dos sistemas produtivos, existem diversas complexidades capazes de se autoinfluenciar, com base nas interações existentes entre elas (Bliss, 2000; Jacobs, 2007; Suh, 2003, 2005). Uma delas, a complexidade de produtos, é capaz de gerar efeitos diversos dentro de todo o sistema de produção e em seus elementos, afetando, assim, as demais complexidades existentes. Com isso, Danilovic & Browning (2007), Jacobs (2007) e Pasche (2008) afirmam que a complexidade de produtos não somente influencia elementos da manufatura, mas também é influenciada por estes ao longo de todo o processo produtivo, conforme pode ser visto na Figura 2.

Para Pasche (2008), a complexidade do produto é resultante das ações de seu desenvolvimento, decorrentes das decisões das equipes de PDP. O autor afirma ainda que a equipe de projeto e desenvolvimento deve conhecer bem as reais necessidades e desejos do mercado consumidor, pois tais necessidades são a base para a variação da complexidade de produtos, além de possuir domínio sobre as novas tecnologias e capacidade criativa para propor alternativas de projeto simples e com menos complexidade.

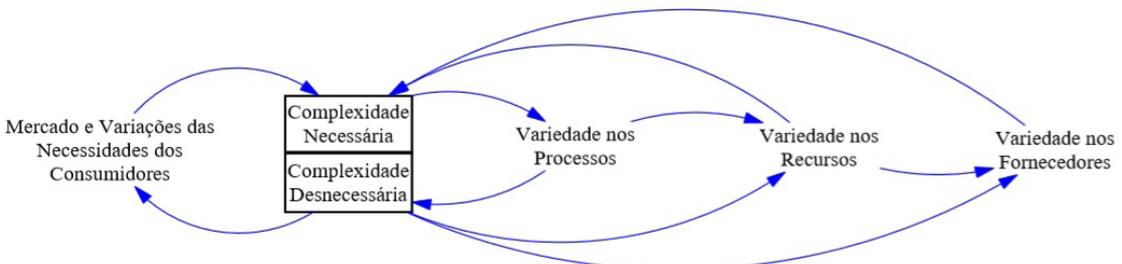
Por outro lado, outros autores (Danilovic & Browning, 2007; Suh, 2003, 2005) afirmam que o setor de desenvolvimento de produtos não consegue mensurar, identificar nem ter noção dos custos e impactos que a complexidade inserida nos produtos pode causar ao sistema de produção como um todo.

Em consonância, Kinnunen (2006) e Shibata et al. (2003), com base em testes empíricos, afirmam que usualmente ocorre queda contínua da produtividade dos sistemas, à medida que a complexidade do produto, do processo e da manufatura aumenta. Ao se tratar de produtividade, Ferreira (2003) afirma que pode ser considerada um dos resultados mais simples de ser obtido e, ao mesmo tempo, mais importante para a gestão de produção.

Ainda nesse contexto, Ferreira (2011) e Alberton (2006) afirmam que mesmo tendo seu conceito apresentado sob diversas perspectivas, a ideia principal da produtividade retoma sempre a relação entre a produção e um ou mais de seus fatores de entrada empregados. Em consonância, diversos autores (Liker, 2005; Martins & Laugeni, 2005; Meredith & Shafer, 2002; Nito, 2003; Silva, 2010; Ferreira, 2003, 2011; Alberton, 2006; Carvalho, 2002) afirmam que a produtividade pode ser definida como a relação entre o que foi produzido por um sistema e os insumos em termos reais utilizados para o alcance do que foi produzido, como capital investido, mão de obra empregada, tempo de produção, entre outros fatores.

Com isso, ao fazer uma análise da Figura 2, pode-se perceber que o aumento da complexidade de produtos gera impactos diretos na variedade, segundo três importantes componentes do sistema produtivo, como seus processos, seus fornecedores e recursos necessários para a execução e produção. Tais impactos são provenientes de dois tipos de complexidades: necessárias e desnecessárias. As necessárias se relacionam aos incrementos nos produtos decorrentes do objetivo de atendimento das necessidades dos clientes, enquanto desnecessárias podem ser compreendidas como os incrementos gerados nos produtos pela empresa e que não serão considerados importantes pelos clientes que farão uso do produto (Danilovic & Browning, 2007).

Inúmeras são as alterações que podem ser feitas nos produtos e que contribuirão, de modo direto, para o aumento ou redução de sua complexidade e, conseqüentemente, a geração de efeitos dentro dos sistemas de produção. Diversos autores (Bozarth et al.,



**Figura 2.** A complexidade de produtos e suas influências dentro da manufatura. Fonte: Adaptada de Danilovic & Browning (2007), Jacobs (2007) e Pasche (2008).

2009; ElMaraghy et al., 2005, 2012; MacDuffie et al., 1996; Badrous, 2011; Zhu et al., 2008; Jacobs, 2007; Blecker et al., 2004; Hobday, 1998; Kotteaku et al., 1995; Rodríguez-Toro et al., 2003; Dalglish et al., 2000; Eskilander, 2011; Wang et al., 2011; Bliss, 2000; ElMaraghy & Urbanic, 2004; Suh, 2003; Danilovic & Browning, 2007; Lee, 2003; Schulz, 2008; Closs et al., 2008) apresentam, em seus estudos, os mais variados efeitos que o aumento em um dos quatro elementos que caracterizam a complexidade de produtos, conforme exposto na Figura 1, pode gerar nos sistemas produtivos.

Deste modo, dada a convergência de ideias de todos os autores mencionados no parágrafo anterior, o Quadro 1 foi estruturado e apresenta os efeitos que os incrementos na complexidade de produtos podem gerar na manufatura. Do Quadro 1, pode-se perceber que o aumento em um dos elementos da complexidade dos produtos pode provocar possíveis alterações nos tempos de operação dos processos produtivos. Deste modo, tem-se que o aumento ou a redução dos tempos dos processos produtivos acabam impactando diretamente na produtividade do sistema, pois quanto maior o tempo para um processamento específico, menor será a velocidade de produção que o sistema venha a apresentar, a qual é causa direta da redução da produtividade (Nito, 2003; Silva, 2010; Carvalho, 2002).

Deste modo, para fins desta pesquisa, a produtividade do sistema será analisada pela relação entre a quantidade

de produtos que o processo é capaz de produzir em um período predeterminado, conforme a Equação 1.

$$\text{Produtividade da linha} = \frac{\text{Produção obtida (unidades)}}{\text{Tempo de Produção (hora)}} \quad (1)$$

No entanto, alguns autores (Nito, 2003; Silva, 2010; Carvalho, 2002) afirmam que diversas podem ser as formas pelas quais se pode analisar a produtividade de um sistema de produção. Contudo, o modelo proposto trata-se de um modelo de simulação dinâmica, ou seja, que emprega os preceitos e lógicas da dinâmica de sistemas, a qual permite a análise do comportamento das variáveis ao longo do tempo. A Equação 1 é a que melhor se enquadra para a análise da produtividade do sistema, já que permitirá a verificação, ao longo do tempo, do comportamento da produtividade da linha de produção, ao passo que os incrementos da complexidade do produto são inseridos no modelo proposto.

### 3 Modelo proposto

O modelo desenvolvido teve como base o modelo genérico da Figura 3 apresentado por Sterman (2000). Apresenta os principais elementos que uma estrutura de produção de bens deve apresentar, englobando elementos como a coleta dos dados brutos de demanda de mercado, por meio da variável “Solicitação dos Clientes”, bem como seu planejamento por meio da variável “Previsão de Demanda”. Em sequência, pode-se notar todo o processo pelo qual o produto

**Quadro 1.** Efeitos da complexidade de produtos na manufatura.

Elementos que caracterizam a complexidade de produtos	Autores	Efeitos causados na manufatura
Número de componentes	Jacobs (2007); Badrous (2011); MacDuffie et al. (1996); Bozarth et al. (2009); Wang et al. (2011); Danilovic & Browning (2007); Lee (2003); Schulz (2008); Zhu et al. (2008); Bozarth et al. (2009); Blecker et al. (2004); Closs et al. (2008).	Aumento do tempo de ciclo dos processos; Aumento no <i>lead time</i> produtivo; Aumento do tempo de atravessamento dos produtos; Necessidade de novos postos de trabalho;
Matéria-prima dos componentes	Wang et al. (2011); Zhu et al. (2008); MacDuffie et al. (1996); Bozarth et al. (2009); Badrous (2011); Lee (2003); Schulz (2008); ElMaraghy et al. (2012); Danilovic & Browning (2007).	Necessidade de horas extras; Necessidade de novos turnos de trabalho; Necessidade de mais mão de obra;
Geometria dos componentes	Dalglish et al. (2000); Badrous (2011); Zhu et al. (2008); ElMaraghy et al. (2012); Rodríguez-Toro et al. (2003); Lee (2003); Eskilander (2011); Danilovic & Browning (2007); Schulz (2008).	Novas contratações; Aumento dos custos de produção; Necessidade de novos processos; Aumento no nível de estoque de produtos;
Interações entre os componentes	Closs et al. (2008); Blecker et al. (2004); Zhu et al. (2008); Danilovic & Browning (2007); Wang et al. (2011); Badrous (2011); Bozarth et al. (2009); Jacobs (2007).	Aumento no número de componentes dos produtos necessários em estoque; Aumentos dos índices de retrabalho e inatividade da linha de produção.

Fonte: O autor.

passará, sendo este iniciado pela variável “Taxa de Entrada de Produtos”, que será responsável pela entrada de insumos no processo produtivo, entregando como resposta a quantidade de produtos fabricados, por meio da variável “Taxa de Saída de Produtos”. A “Taxa de Saída de Produtos” será responsável pelo abastecimento de produtos na variável “Estoque Final de Produtos”, finalizando o processo com a variável “Entrega de Produtos”, que apresentará a quantidade de itens que serão retirados do sistema e entregues ao mercado.

O modelo proposto emprega constantes interações entre as variáveis adotadas, permitindo, assim, a criação da não linearidade presente em modelos que empregam a dinâmica de sistemas. Essas interações entre as variáveis estão presentes na Figura 4, que expõe o diagrama causal desenvolvido e utilizado como base para a construção do modelo de simulação.

O diagrama da Figura 4 mostra os ciclos de controle e realimentação presentes dentro do sistema e que acabam por proporcionar a manutenção e o equilíbrio de seu funcionamento. Ao se tratar da entrada de informações no diagrama da Figura 4, salienta-se que ocorrerá por meio da variável “Demanda de

Mercado”, a qual é responsável também pelas saídas de produtos do sistema, mediante sua influência na variável “Saída de Produtos do Sistema”. Além dessas interações, cabe destacar também a existência das defasagens de tempo que o diagrama possui, representando, assim, os *delays*, que são responsáveis pelo comportamento dinâmico dos sistemas (Santos, 2006; Sterman, 2000).

No diagrama apresentado na Figura 4, os *delays* são representados pela letra “D” presente nas flechas de ligação entre os elementos. Esses atrasos correspondem ao período decorrido para que mudanças de comportamento ocorram nas variáveis. Logo, esses intervalos de tempo são necessários, pois tais alterações não são sentidas de modo imediato no sistema, necessitando, assim, de um intervalo de tempo para que isso ocorra.

O modelo proposto foi estruturado como mostra a Figura 5 e baseado no diagrama causal da Figura 4, na aplicação de diagramas de fluxo e estoques disponíveis no software Vensim® PLE (versão 6.3) e em algumas equações diferenciais para a criação de ambientes dinâmicos.

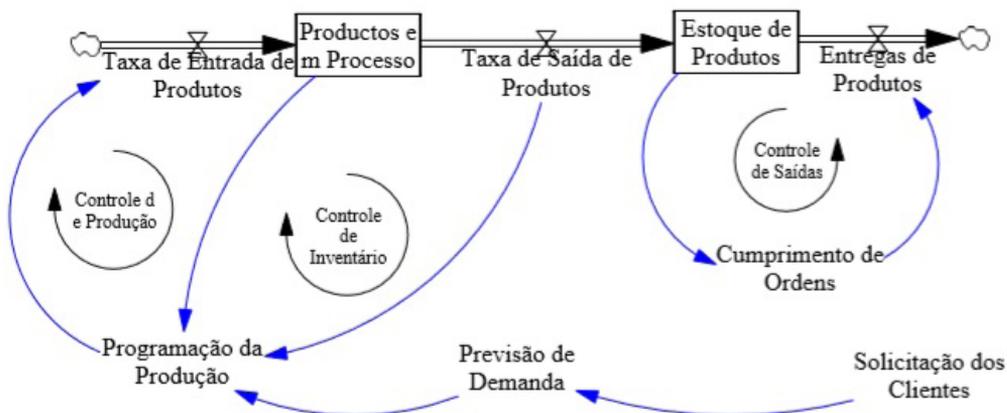


Figura 3. Modelo genérico para um sistema de produção. Fonte: Adaptada de Sterman (2000).

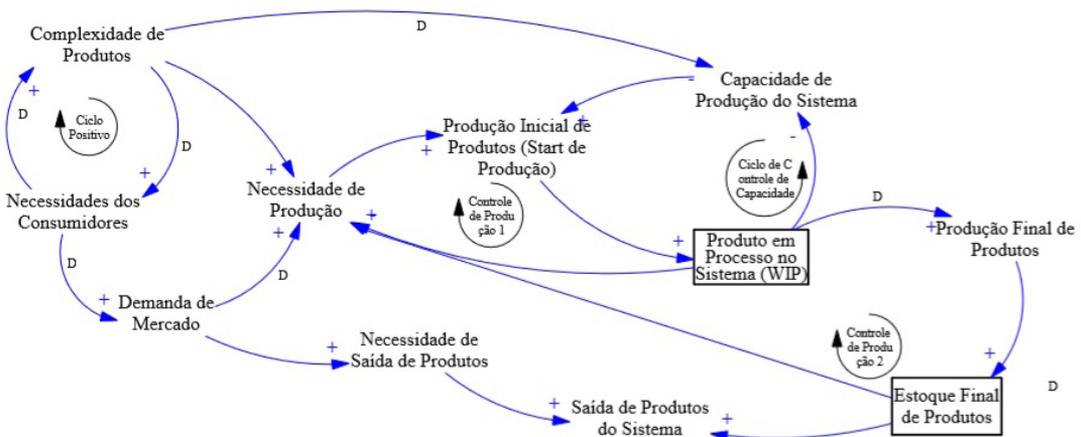


Figura 4. Diagrama causal do modelo proposto. Fonte: O autor.

É composto de dois grandes blocos interligados, em que cada um deles possui o seu conjunto de variáveis estoques e fluxos e representa uma linha de produção genérica, que possibilita a fabricação de produtos diferentes. O modelo considera também que a complexidade dos produtos se dá por alterações nos elementos que a caracterizam e, por sua vez, serão sentidas pelas mudanças nos tempos de processamento presentes nele.

Com isso, visando a uma melhor compreensão da modelagem, a Figura 6 apresenta um diagrama causal

que ilustra onde os efeitos ocasionados pelas variações na complexidade de produtos podem ser sentidos dentro do modelo. Também, busca-se apresentar onde o incremento da complexidade de produtos é inserido dentro do modelo, dadas as suas alterações pela equipe de desenvolvimento de produtos.

Ao tratar das variáveis que compõem o modelo proposto, o Quadro 2 apresenta uma breve descrição de cada uma das variáveis do modelo, objetivando, assim, uma melhor compreensão de sua estruturação e lógica de interação.

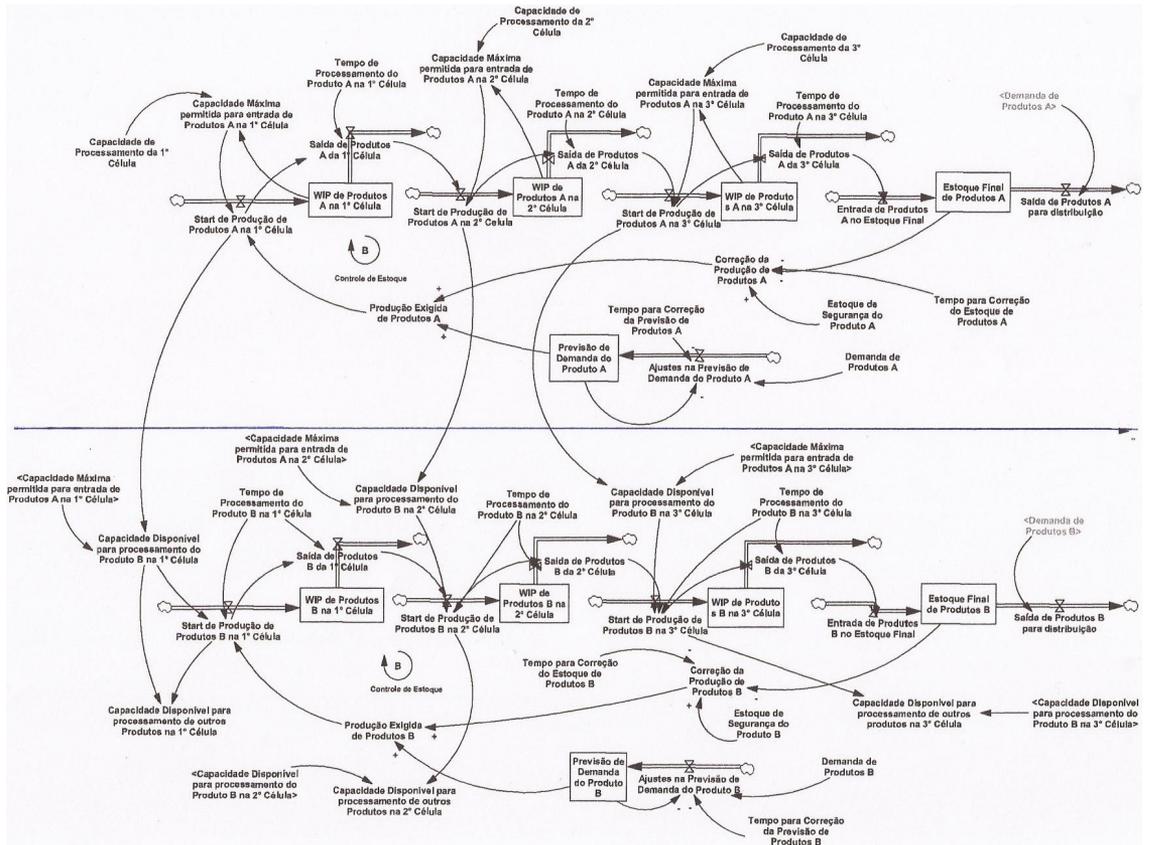


Figura 5. Modelo proposto. Fonte: O autor.



Figura 6. Efeitos da complexidade de produtos no sistema produtivo. Fonte: O autor.

**Quadro 2.** Descrição das variáveis do modelo.

<b>Variáveis de análise</b>	<b>Definição</b>	<b>Variáveis influenciadas</b>
Demanda de produtos	Quantidade de produtos demandados para a empresa	Previsão de demanda dos produtos
Previsão de demanda dos produtos	Quantidade de pedidos ajustada com base nas expectativas da empresa	Produção exigida de produtos
Ajustes na previsão de demanda	Ajustes necessários na demanda, com base em uma taxa de variação estipulada ao longo do tempo pela organização	Previsão de demanda dos produtos
Tempo para correção da previsão de produtos	Período de tempo necessário para que as variações na demanda sejam sentidas dentro da organização	Previsão de demanda dos produtos
Produção exigida de produtos	Quantidade de produtos necessários, dada uma atualização constante com base na quantidade de pedidos já em estoque	<i>Start</i> de produção de produtos na célula
<i>Start</i> de produção de produtos na célula	Quantidade de produtos que entram na célula de produção para processamento	Saída de produtos da célula; <i>WIP</i> de produtos na célula
<i>WIP</i> de produtos na célula	Quantidade de produtos que está em processo de transformação na célula	Saída de produtos da célula; capacidade máxima permitida para <i>start</i> de produção de produtos na célula
Saída de produtos da célula	Quantidade de produtos processada pela célula de produção	<i>Start</i> de produção de produtos na célula; entrada de produtos no estoque final
Capacidade máxima permitida para entrada de produtos na célula	Quantidade possível de insumos que podem entrar na célula para ser processada em um determinado momento dada a quantidade que já está em processo	<i>Start</i> de produção de produtos na célula
Capacidade de processamento da célula	Quantidade máxima de produtos que a célula é capaz de processar. Esse valor usualmente é estimado pela capacidade nominal dos equipamentos presentes nela	Capacidade máxima permitida para entrada de produtos na célula
Tempo de processamento do produto na célula	Tempo necessário para que o produto seja concluído dentro da célula, dados os processos pelo qual deva passar	Saída de produtos da célula
Capacidade disponível para processamento de produtos na célula	Quantidade de produtos que a célula ainda pode processar, dada sua utilização atual em um determinado momento	<i>Start</i> de produção de produtos na célula
Entrada de produtos no estoque final	Quantidade de produtos acabados que entram em estoque para distribuição e/ou armazenamento	Estoque final de produtos
Estoque final de produtos	Quantidade de produtos acabados em estoque no sistema	Saída de produtos para distribuição; correção da produção de produtos
Estoque de segurança	Quantidade mínima de produtos em estoque que o sistema deve possuir	Correção da produção de produtos; estoque final de produtos
Correção da produção de produtos	Quantidade de produtos que devem ou não ser inseridos na produção exigida, objetivando manter estoque suficiente para atender às necessidades da empresa	Produção exigida de produtos
Tempo para correção do estoque de produtos	Período necessário para que variações no estoque sejam sentidas dentro do sistema e corrigidas	Correção da produção de produtos

Fonte: O autor.

## 4 Efeitos da complexidade de produtos na produtividade

Para análise dos aumentos no grau de complexidade dos produtos, adotou-se a existência de um produto dotado de uma complexidade padrão “1”, que é composta apenas de componentes e interações já utilizados no processo. Pelo fato de o trabalho considerar que os aumentos gradativos nos elementos da complexidade dos produtos podem afetar os tempos dos processos e suas operações, adotou-se para cada um desses componentes a existência de um tempo padrão associado.

Com isso, além da definição de um tempo padrão para cada um dos componentes que formam a estrutura do produto, definiu-se também em qual célula de produção do modelo proposto o processamento desses componentes ocorre. Por meio desses passos, pode-se, então, conhecer as alterações em cada uma das células de produção que o aumento da complexidade pode gerar e que serão a base para as simulações e testes com o modelo. Deste modo, dois grupos de simulações foram realizados. No primeiro, verificaram-se os efeitos que a complexidade de produtos pode gerar na produtividade do sistema, sem levar em consideração a presença de possíveis restrições de capacidade. No segundo, restrições de capacidade foram levadas em consideração para a análise dos efeitos dos incrementos da complexidade.

### 4.1 Primeiro grupo de análise

Para este grupo de simulação, considera-se a inexistência de restrições de capacidade e a produção de um produto dotado de uma complexidade padrão “1”, a qual é formada apenas por componentes e interações padrões, sendo o primeiro responsável por 54% dessa complexidade, enquanto as interações representam 46%. Portanto, a complexidade padrão do produto não emprega em sua composição componentes com geometria ou matéria-prima diferentes.

Com base nesse produto, as simulações apresentadas foram desenvolvidas aplicando-se incrementos sucessivos de 10% na complexidade total do produto padrão, até que o produto apresentasse o dobro de sua complexidade padrão. Entretanto, esses incrementos sucessivos foram aplicados de modo distinto. No primeiro deles, cada incremento de 10% na complexidade gerou alterações similares nas três células de produção; já no segundo modo, os incrementos geraram alterações distintas em cada uma das células.

Em sequência, três novos modos para incrementos da complexidade foram aplicados. Neles, os incrementos sucessivos de 10% geraram alterações apenas inicialmente apenas na primeira célula de produção, mantendo-se as demais sem alterações. Logo após essa simulação, repetiram-se os mesmos

incrementos, só que agora apenas a segunda célula sofreu alterações e, posteriormente, a terceira.

Cabe salientar que para o desenvolvimento de todas as simulações mencionadas no parágrafo anterior, os seguintes valores para as variáveis exógenas do modelo proposto foram adotados:

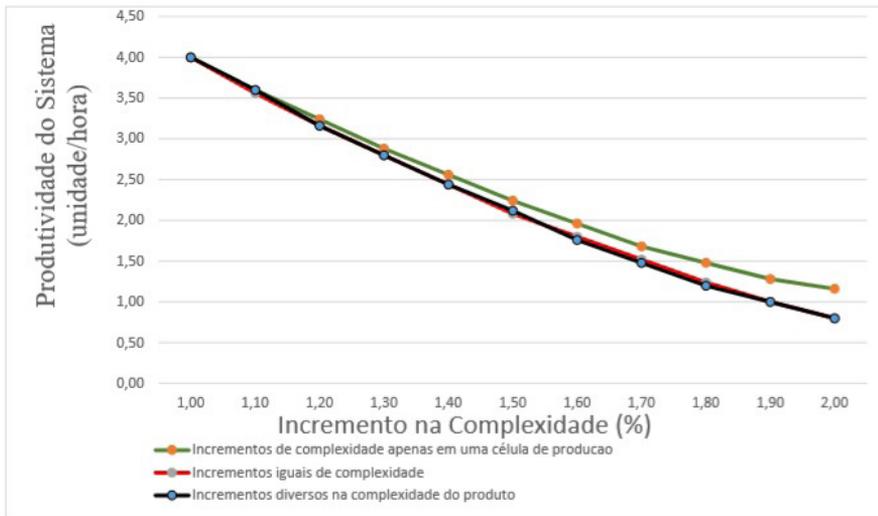
- Demanda do produto: 100 unidades;
- Capacidade de processamento da 1ª célula: 100 unidades;
- Capacidade de processamento da 2ª célula: 100 unidades;
- Capacidade de processamento da 3ª célula: 100 unidades;
- Estoque de segurança: 0 unidade.

De posse dessas considerações, a Figura 7 apresenta em um só gráfico, a curva de produtividade obtida com todas as simulações realizadas nesse grupo.

Dos resultados obtidos com essas simulações, pode-se perceber que a produtividade do sistema referente à produção do produto com complexidade padrão “1” é 4 unidades/hora, logo, com essa produtividade inicial, o sistema é capaz de produzir a demanda solicitada em 25 horas de simulação. Entretanto, ao se analisar a produtividade do sistema quando os primeiros 10% a mais de complexidade são inseridos no produto, gerando alterações similares nas três células, nota-se que a produtividade dele cai para 3,56 unidades/horas, representando, assim, uma perda de 11% na produtividade. Ao final desses incrementos, percebe-se que o dobro de complexidade foi capaz de gerar uma perda de 53,1% na produtividade do processo, fazendo, assim, com que a linha de produção não consiga produzir a demanda solicitada.

Em sequência às análises dos resultados apresentados na Figura 7 e no que diz respeito ao comportamento da produtividade diante do aumento da complexidade capaz de gerar alterações diferentes em cada uma das células, percebe-se que o dobro de complexidade no produto fez com que a produtividade do sistema sofresse uma redução na produção de 4,00 para 0,80 unidade/hora, implicando, assim, perda de 53,3% de produtividade.

Para esses dois primeiros resultados, percebe-se que as quedas na produtividade apresentam valores muito próximos, ou seja, 53,1% para alterações iguais e 53,3% para diferentes. Com base nesses resultados, constata-se, então, que a produtividade é afetada principalmente pelo incremento de complexidade que se aplica no produto, e não pela distribuição que esta apresenta dentro do processo. Com isso, um conjunto exaustivo de novas simulações foi realizado, em que os aumentos na complexidade do



**Figura 7.** Comportamentos obtidos com todas as variações na complexidade do produto. Fonte: O autor.

produto padrão geraram alterações apenas em uma das células de produção.

Como resultado desse novo conjunto de simulações, percebe-se que a perda de produtividade total proveniente da produção de um produto 100% mais complexo foi de 48,5%, passando, então, a produzir 1,16 produto/hora e não mais 4,00 unidades/hora. Em um comparativo com a queda de produtividade obtida com as primeiras simulações, em que os incrementos na complexidade do produto geram alterações em todas as três células de produção, constata-se que a queda de produtividade foi maior, apresentando perda de 53,2%, ou seja, um ganho médio na produtividade de 4,7%.

Esses resultados distintos de produtividade ocorrem primeiramente pelo fato de o sistema dispor de 30% de capacidade ociosa, logo não operando no limite máximo de produção. Com isso, quando o aumento da complexidade altera o processo de produção de apenas uma célula, o atraso produtivo é sentido apenas nessa célula, enquanto as demais darão sequência à produção de modo mais rápido que a afetada. Entretanto, quando o aumento na complexidade altera o processo das três células, um atraso proporcional será sentido em todas elas, deixando com isso todo o processo mais lento, implicando, assim, menor taxa de produção dos produtos por células, que, por sua vez, acarretará maior queda na produtividade total do sistema.

## 4.2 Segundo grupo de análise

Com a demonstração de que os incrementos na complexidade afetam a produtividade do sistema, sem a presença de possíveis restrições de capacidade, as simulações apresentadas neste novo grupo de simulações foram desenvolvidas com o objetivo de analisar os

efeitos na produtividade, levando em consideração, agora, a presença de restrições na capacidade de produção das células do modelo proposto.

Em relação aos valores adotados para as variáveis exógenas do modelo proposto, salienta-se que os mesmos valores foram empregados para a demanda solicitada do produto e para o estoque de segurança. Entretanto, as variáveis relacionadas com a capacidade de processamento das células foram alteradas para valores mínimos, os quais permitissem a produção de toda a demanda solicitada, ou seja, a produção de 100 unidades de produtos.

Para tanto, um conjunto exaustivo de simulações foi desenvolvido até que a capacidade mínima que cada célula deve dispor fosse determinada, objetivando, assim, a produção de toda a demanda solicitada no tempo de 25 horas, conforme já mencionado. Com isso, obteve-se, então, que a capacidade mínima para produzir toda a demanda, sem perda na produtividade do produto padrão, é de 40 unidades de produtos em processamento por célula de produção.

Portanto, se a capacidade de produção de qualquer uma das células for inferior a esse valor apresentado, o sistema não conseguirá manter sua produção com o mesmo índice de produtividade. Por exemplo, ao se arbitrar a capacidade de processamento de umas das células em um valor de 39 unidades, comprovou-se, por meio de simulações, que o sistema apresenta produtividade de 3,92 unidades/hora, implicando, assim, redução de 2% na produtividade.

Deste modo, para o primeiro conjunto de simulações, aplicou-se redução de 10% na capacidade apenas na primeira célula. Em sequência, esse mesmo procedimento foi realizado com a segunda e a terceira. Com a primeira célula de produção tendo capacidade 10% menor que as demais, dois tipos de incrementos

na complexidade foram inseridos. No primeiro deles, esse incremento gerou alterações iguais em todas as células, e no segundo, alterações distintas. A Figura 8 demonstra o comportamento obtido com os dois conjuntos de simulações realizados.

Nas simulações em que as alterações geradas pela complexidade foram sentidas igualmente nas células, percebe-se que houve queda de 59,6% na produtividade do processo. Já para alterações diferentes nos processos das células, obteve-se queda na produtividade de 59,4%. Em um comparativo com os resultados obtidos do primeiro grupo de simulação, pode-se perceber que a presença do gargalo na primeira célula de produção contribuiu com redução média na produtividade do sistema em torno de 6,3%.

Por meio desses resultados, buscou-se perceber qual o efeito gerado no sistema, quando o incremento na complexidade do produto provoca alterações apenas na célula de produção que apresenta redução de 10% na capacidade. Em seguida, buscou-se analisar também o comportamento do sistema quando esses mesmos incrementos ocorrem apenas nas células que

não possuem redução em sua capacidade. Mais de duzentas simulações alterando o gargalo de produção e as possíveis alterações que a complexidade de produtos pode gerar em uma só célula foram feitas, buscando-se, assim, compreender o comportamento geral que a produtividade apresenta. Com isso, a Figura 9 apresenta uma concatenação dos principais resultados obtidos, em um só gráfico, das análises realizadas.

Por meio da Figura 9, nota-se que a presença de uma restrição com incrementos em uma só célula de produção gera no processo queda na produtividade de 62,2%, ou seja, perda de mais da metade da capacidade do sistema. Em contrapartida, quando o incremento e a restrição não estão presentes em uma mesma célula de produção, percebe-se que o sistema também não é mais capaz de produzir toda a demanda solicitada, o que, por sua vez, proporciona queda na produtividade de 59%.

Em uma análise dos primeiros resultados obtidos com as simulações e considerando apenas os incrementos na complexidade obtidos no primeiro

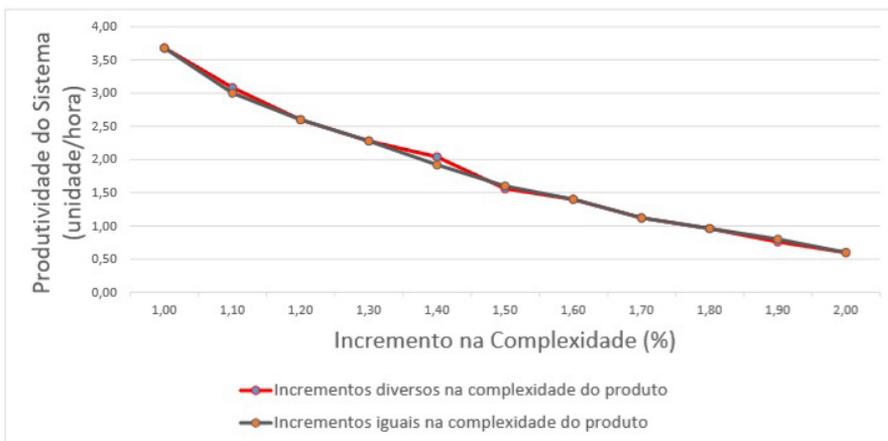


Figura 8. Comportamento da produtividade, sendo a primeira célula gargalo. Fonte: O autor.

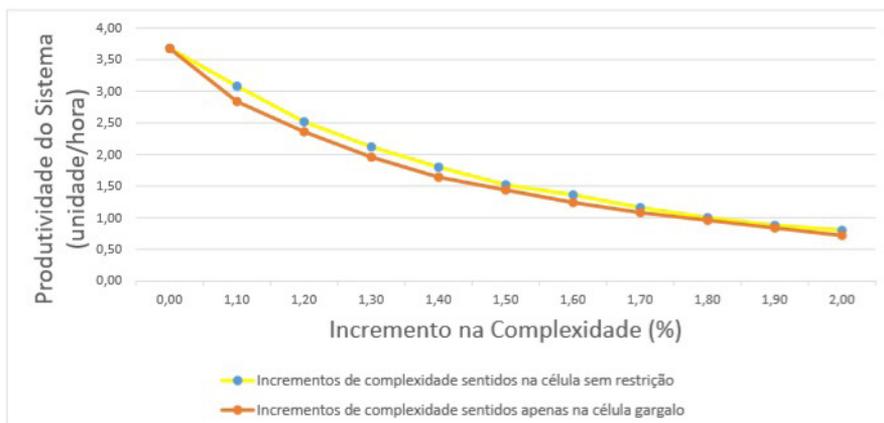


Figura 9. Produtividade com incrementos de complexidade sentidos nos dois tipos de células. Fonte: O autor.

grupo de simulação, pôde-se notar que a presença do gargalo em pelo menos uma das células da linha de produção, com o incremento da complexidade, proporcionou redução de 14,5% na produtividade de todo o sistema. Com essa redução, a produtividade do sistema passou a ser, em média, de 1,63 produto/hora, logo o sistema se tornou capaz de produzir apenas cerca de 40% da demanda solicitada, deixando, assim, de entregar ao mercado mais da metade de toda a produção planejada.

No entanto, quando se analisam os efeitos decorrentes da presença de restrições no sistema e os incrementos na complexidade alterando apenas os processos das células não gargalo, tem-se que a redução da produtividade no sistema cai, em média, 10%, quando comparado com as simulações do primeiro grupo. Com isso, pode-se notar que tanto as restrições de capacidade como os incrementos na complexidade são capazes de gerar impactos na produtividade do sistema, entretanto estes são fortemente mais sentidos pelo aumento da complexidade dos produtos.

Logo, a equipe de desenvolvimento de novos produtos, quando planeja ou projeta um produto mais complexo, deve analisar, além dos elementos que proporcionam mais complexidade ao produto, os pontos dentro do processo produtivo que esses novos incrementos causam e alterações que possam vir a prejudicar a capacidade de produção do sistema.

Com isso, além de a equipe de desenvolvimento de produtos estar focada no atendimento das necessidades dos consumidores, estará também analisando a melhor forma como esse novo produto poderá ser processado sem que a nova complexidade dele seja capaz de gerar mais perdas ao processo. Essa afirmativa converge, então, com as afirmações já apresentadas por diversos autores (Perona & Miragliotta, 2004; Schleich & Schaffer, 2007; Badrous, 2011; Ramdas, 2003), ao salientarem que a complexidade deve se tornar o núcleo de capacidade superior e diferenciador das empresas ante a concorrência, controlando, assim, o nível crescente de complexidade dos produtos e distribuindo-o de modo eficaz dentro do ambiente fabril.

Deste modo, o incremento na complexidade dos produtos poderá gerar no processo, ou na linha de produção, a criação de novas operações para que o produto seja produzido integralmente. Esse incremento de novas operações pode implicar uma série de efeitos dentro do sistema, como a exigência de horas extras para a conclusão da demanda dentro do tempo máximo. Entretanto, o incremento de complexidade pode afetar de tal modo o processo que a produtividade do sistema seja garantida apenas com a criação de um novo turno de trabalho na madrugada, portanto, sendo necessários mais mão de obra, equipamentos e matérias-primas.

Ao se tratar de simulações realizadas, cabe salientar que se considerou no sistema de produção a presença de mais de uma célula gargalo, as quais apresentaram resultados similares aos já obtidos. Isto decorre do fato de o sistema de produção já estar operando em seu limite de produção, logo a presença de um gargalo é suficiente para a redução da produtividade dele.

Outro ponto abordado nas diversas simulações foi o emprego de restrições de capacidade acima de 10%, sendo os resultados obtidos diretamente proporcionais a essa restrição de capacidade. Logo, os efeitos decorrentes dos incrementos na complexidade do produto serão os mesmos no processo e a perda produtiva será proporcional apenas pela nova restrição imposta ao sistema.

## 5 Conclusões

Esta pesquisa contribuiu para o estudo e a análise da complexidade de produtos e seus efeitos nos sistemas de produção, mediante o desenvolvimento de um modelo de simulação para verificar os efeitos causados pela complexidade de produtos na produtividade da manufatura. Ao se tratar do estudo da complexidade e com base em todo o levantamento bibliográfico realizado, conclui-se que seu conceito e definição são abstratos e generalistas, decorrentes das diversas visões que cada pesquisador busca imprimir a ela.

De forma similar, observou-se também que complexidade de produtos não possui um conceito único e aceito universalmente na literatura, já que sua definição e escopo são definidos com base no objetivo específico de cada pesquisador. Entretanto, mesmo diante dos diversos conceitos apresentados, nota-se que a complexidade de produtos usualmente é caracterizada e estudada sob o olhar de quatro elementos principais que formam a estrutura dos novos produtos.

No que diz respeito aos efeitos que a complexidade pode gerar na produtividade da manufatura, conclui-se que os incrementos sucessivos de complexidade nos produtos provocam redução direta na produtividade do processo. Deste modo, essas quedas na produtividade impactam diretamente na quantidade de produtos fabricados pelo sistema, decorrente da redução de sua velocidade de produção. Logo, essa redução de velocidade afeta a capacidade de atendimento da demanda solicitada pelo mercado consumidor dentro de um prazo preestabelecido, bem como em outros pontos, como no número de postos de trabalhos, novos turnos de produção, horas extras, entre outros.

O conhecimento prévio do processo produtivo e dos pontos em que possa haver possíveis limitações de capacidade é essencial para a obtenção de melhores resultados quanto à produtividade do sistema, dado que incrementos na complexidade dos produtos que provoquem alterações significativas em gargalos do processo podem provocar mais perdas produtivas em

todo o processo de produção. Logo, pode-se concluir que os incrementos aditivos na complexidade de produtos podem gerar menos quedas na produtividade da manufatura se gerenciados de modo estratégico, ou seja, levando-se em consideração também as características inerentes do processo produtivo.

No que diz respeito à possibilidade de trabalhos futuros, propõe-se a consideração, dentro do modelo proposto, de fatores externos à organização, como a análise de mercado e possíveis causas que possam gerar oscilações na demanda dos produtos simulados. Outro ponto para possíveis trabalhos reside no desenvolvimento de modelos de simulação que permitam a estruturação e a análise dos efeitos causados nos tempos de processamento dos produtos, decorrentes de possíveis alterações pontuais em cada um dos elementos que caracterizam a complexidade de produtos.

## Referências

- Alberton, V. (2006). *Distribuição de ganhos da produtividade do trabalho no complexo metal-mecânico brasileiro* (Dissertação de mestrado). Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Badrous, S. N. S. (2011). *Complexity of products and their assembly systems* (Tese de doutorado). University of Windsor, Ontario.
- Blecker, T., Abdelkafi, N., Kaluza, B., & Kreutler, G. (2004). Mass customization vs. complexity: a gordian knot. In *Proceedings of the 2nd International Conference, an Enterprise Odyssey: Building Competitive Advantage*. Zagreb: Graduate School of Economics & Business.
- Bliss, C. (2000). *Management von Komplexität*. Wiesbaden: Gabler Verlag. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-10720-0>.
- Bozarth, C. C., Warsing, D. P., Flynn, B. B., & Flynn, E. J. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance. *Journal of Operations Management*, 27(1), 78-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2008.07.003>.
- Carvalho, P. G. M. (2002). A indústria brasileira pós-abertura: uma especialização regressiva? *Economia Aplicada*, 6(3), 639-651.
- Closs, D. J., Jacobs, M. A., Swink, M., & Webb, G. S. (2008). Toward a theory of competencies for the management of product complexity: six case studies. *Journal of Operations Management*, 26(5), 590-610. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2007.10.003>.
- Dalglish, G., Jared, G. E. M., & Swift, K. G. (2000). Design for assembly: influencing the design process. *Journal of Engineering Design*, 11(1), 17-29. <http://dx.doi.org/10.1080/095448200261162>.
- Danilovic, M., & Browning, T. T. (2007). Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. *International Journal of Project Management*, 25(3), 300-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003>.
- ElMaraghy, W., & Urbanic, R. J. (2004). Assessment of manufacturing operational complexity. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 53(1), 401-406. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60726-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4).
- ElMaraghy, H. A., Kuzgunkaya, O., & Urbanic, R. (2005). Comparison of manufacturing system configurations: a complexity approach. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 54(1), 445-450. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60141-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60141-3).
- ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 61(2), 793-814. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>.
- Eskilander, S. (2011). *Design for automatic assembly: a method for product design: DFA2* (Tese de doutorado). Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Ferreira, A. L. (2003). *Rota de navegação: desafio Sebrae*. Rio de Janeiro: Expert Books.
- Ferreira, S. M. (2011). *Aumento da produtividade: utilizando a metodologia Six sigma e lógica Fuzzy, um estudo de caso em uma empresa do Pólo industrial de Manaus – PIM* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Pará, Manaus.
- Giovannini, F. (2002). *As organizações e a complexidade: um estudo de sistemas de gestão da qualidade* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Gottfredson, M., & Aspinall, K. (2005). Innovation versus complexity: what is too much of a good thing? *Harvard Business Review*, 83(11), 62. PMID:16299961.
- Gupta, S., & Krishnan, V. (1999). Integrated component and supplier selection for a product family. *Production and Operations Management*, 8(2), 163-182. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.1999.tb00368.x>.
- Hobday, M. (1998). Product complexity: Innovation and industrial organization. *Research Policy*, 26(6), 689-710. [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333\(97\)00044-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(97)00044-9).
- Jacobs, M. (2007). Product complexity: a definition and impacts on operations. *Decision Line*, 38(5), 6-12.
- Kaski, T., & Heikkila, J. (2002). Measuring product structures to improve demand supply chain efficiency. *International Journal of Technology Management*, 23(6), 578-598. <http://dx.doi.org/10.1504/IJTM.2002.003027>.
- Kinnunen, M. J. (2006). *Complexity measures for system architecture models* (Dissertação de mestrado). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Kotteaku, A. G., Laios, L. G., & Moschuris, S. I. (1995). The influence of product complexity in the purchasing structure. *Omega*, 23(1), 27-39. [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0483\(94\)00055-F](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0483(94)00055-F).

- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2007). *Fundamentos de metodologia científica* (5. ed.). São Paulo: Atlas.
- Lee, T. S. (2003). *Complexity theory in axiomatic design* (Tese de doutorado). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Liker, J. L. (2005). *O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo*. Porto Alegre: Bookman.
- MacDuffie, J. P., Sethuraman, K., & Fisher, M. L. (1996). Product variety and manufacturing performance: evidence from the international automotive assembly plant study. *Management Science*, 42(3), 350-369. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.42.3.350>.
- Martins, P. G., & Laugení, F. P. (2005). *Administração da produção* (2. ed.). São Paulo: Saraiva.
- Meredith, J. R., & Shafer, S. M. (2002). *Administração da produção para MBAs*. Porto Alegre: Bookman.
- Morin, E. (2005). *O método IV: ética*. Portugal: Publicações Europa América.
- Morin, E. (2010). *Ciência com consciência* (14. ed.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Nito, L. C. (2003). *Aplicação do trabalho padronizado com foco na produtividade: um estudo de caso em uma empresa do setor automotivo* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Pasche, M. (2008). Product complexity reduction: not only a strategy issue. In *Proceedings of the 11th Quality Management and Organizational Development Conference*. Helsingborg, Sweden.
- Perona, M., & Miragliotta, G. (2004). Complexity management and supply chain performance assessment: a field study and a conceptual framework. *International Journal of Production Economics*, 90(1), 103-115. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00482-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00482-6).
- Ramdas, K. (2003). Managing product variety: an integrative review and research directions. *Production and Operations Management*, 12(1), 79-101. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2003.tb00199.x>.
- Rodríguez-Toro, C. A., Tate, S. J., Jared, G. E. M., & Swift, K. G. (2003). Complexity metrics for design (simplicity + simplicity = complexity). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 217(5), 721-725. <http://dx.doi.org/10.1243/095440503322011461>.
- Santos, A. M. D. (2006). *A aplicação de um modelo de simulação para o gerenciamento de projetos: um estudo de caso utilizando a dinâmica de sistemas* (Dissertação de mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Schleich, H., & Schaffer, J. (2007). Managing complexity in automotive production. In *Proceedings of the ICPR - XIX International Conference on Production Research*. Valparaiso, Chile: ICPR.
- Schulz, A. A. (2008). *Relações complexas na administração da produção* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Shibata, H., Cheldelin, B., & Ishii, K. (2003). Assembly quality methodology: A new method for evaluating assembly complexity in globally distributed manufacturing. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress* (pp. 335-344). Washington: American Society of Mechanical Engineers. <http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2003-42415>.
- Silva, C. A. L. (2010). *Avaliação da implantação de um sistema de medição da produtividade no ambiente de engenharia de manutenção em usinas hidrelétricas* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: McGraw-Hill.
- Suh, N. P. (2003). *A theory of complexity and applications*. Cambridge: Instituto de Tecnologia de Massachusetts.
- Suh, N. P. (2005). *Complexity in engineering*. Cambridge: Instituto de Tecnologia de Massachusetts. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60019-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60019-5).
- Wang, H. (2010). *Product variety induced complexity and its impact on mixed-model assembly systems and supply chains* (Tese de doutorado). University of Michigan, Michigan.
- Wang, H., Zhu, X., Wang, H., Hu, S. J., Lin, Z., & Chen, G. (2011). Multi-objective optimization of product variety and manufacturing complexity in mixed-model assembly systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(1), 16-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.03.002>.
- Wu, Y., Frizelle, G., & Efstathiou, J. (2007). A study on the cost of operational complexity in customer-supplier systems. *International Journal of Production Economics*, 106(1), 217-229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.06.004>.
- Zhu, X., Hu, S. J., Koren, Y., & Marin, S. P. (2008). Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 130(5), 051013. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2953076>.