



Análise Baseada em Simulação de Sistemas “*One Product Integrated Manufacturing*”

Simulation-based Analysis of “*One Product Integrated Manufacturing*” Systems

Gustavo Furtado Da Silva – gustavofurtado2@gmail.com

Enzo Morosini Frazzon - enzo.frazzon@gmail.com

Nelson Casarotto Filho – ncasarottofilho@gmail.com

Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

One Product Integrated Manufacturing (OPIM) é um sistema de produção colaborativo onde as empresas envolvidas criam fábricas virtuais para atender a demanda de um produto específico. Esse artigo tem o objetivo de analisar o impacto do OPIM no nível de serviço e na utilização de recursos produtivos para que a diferença de desempenho entre um sistema competitivo e colaborativo possa ser mensurada. A avaliação será realizada em um cenário simulado de manufatura. Finalmente, através de uma etapa de simulação-otimização, foi determinado um plano de produção para aprimorar a utilização dos recursos dos parceiros, junto com um nível de serviço aceitável. O artigo termina com a proposta que o OPIM consegue suportar a competitividade dos sistemas produtivos e que a simulação computacional pode facilitar a identificação de problemas no sistema, permitindo testar possíveis correções imediatamente.

Palavras Chave: *One Product Integrated Manufacturing, Empresas Virtuais, Simulação, Otimização.*

Abstract

One Product Integrated Manufacturing (OPIM) stands for a collaboration-oriented production system where involved companies create virtual factories to cope with a specific product demand. This paper aims to analyse the impact of OPIM on service level and the utilization of productive resources, so that the performance difference between competitive and collaborative systems can be measured. The evaluation will consider a simulated manufacturing scenario. Finally, through a simulation optimization step, a production plan to improve the utilization of partners resources along with a proper service level was determined. The paper ends by substantiating that OPIM can support the competitiveness of production systems and computer simulation facilitates the identification of a problem in the system and allows to test a possible fix immediately.

Key Words: One Product Integrated Manufacturing, Virtual Enterprises, Simulation, Optimization.

1. Introdução

Empresas virtuais são alianças temporárias de companhias criadas para explorar as oportunidades de mercado, dividindo custos e compartilhando recursos e competências. Enquanto organizações tradicionais possuem limitações físicas, organizações virtuais são mais dinâmicas e flexíveis, podem ser reconfiguradas, otimizadas e se adaptam mais rapidamente às constantes mudanças do mercado (Tang *et al.*, 2002). Neste contexto, *One Product Integrated Manufacturing* (OPIM) representa um tipo de empresa virtual baseada em engenharia simultânea. Ferramentas tradicionais de gerenciamento foram criadas como suporte a modelos de manufatura tradicionais e lineares, logo não apresentam a mesma eficácia em sistemas baseados em operações paralelas. Outro grande desafio de um sistema OPIM está em sua complexa aplicação, bem como suas dificuldades burocráticas. Tecnologia de informação avançada e um alto nível de confiança entre parceiros são necessários para garantir o sucesso do OPIM.

Esse artigo é direcionado para a exploração e enriquecimento do conhecimento disponível sobre OPIM e produção cooperativa. Mais especificamente, esse artigo busca desenvolver um modelo de simulação-otimização que permita a identificação da configuração mais eficiente de um sistema *One Product Integrated Manufacturing*.

O artigo segue a estrutura a seguir: A seção “Fundamentação teórica” aborda os conceitos de OPIM. Então, a seção “Análise baseada em simulação” apresenta simulações de casos de teste de redes de empresas. No primeiro caso, os clientes estocasticamente escolhem qual dos três fabricantes competindo na mesma região irá fabricar o produto. No segundo caso, os três fabricantes compartilham recursos produtivos sob uma mesma marca e como seus recursos são utilizados é determinado por otimização baseado em simulação. Finalmente, as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros são discutidas na seção “Conclusão”.

2. Fundamentação teórica

De acordo com Putnik e Silva (1995) e Pithon (2016), as fábricas projetadas para produzir vários produtos são tecnicamente menos eficientes comparadas a fábricas dedicadas a um único produto, onde o nível de desempenho atinge o seu máximo.

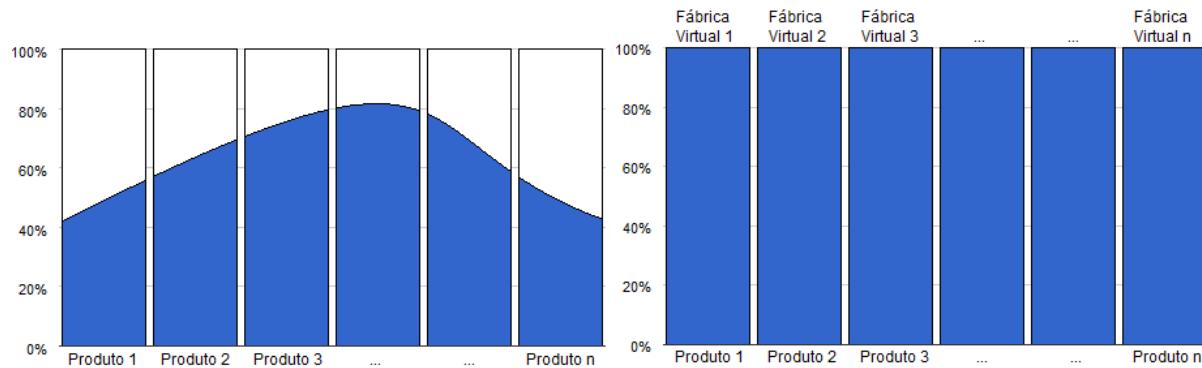


Figura 1. Desempenho de uma fábrica multi-produto vs. um OPIM. Fonte: Putnik e Silva (p. 48, 1995).

A partir dessa premissa, surge o conceito de *One Product Integrated Manufacturing* (OPIM), um conceito organizacional para sistemas de manufatura com o propósito de otimizar a fabricação de um determinado produto. O gráfico à esquerda da Figura 1 mostra que o

desempenho em uma fábrica tradicional varia de produto para produto dependendo da forma como os recursos são utilizados. Já o gráfico à direta apresenta a premissa de um sistema OPIM, onde cada produto possui sua própria fábrica com desempenho otimizado devido a utilização de recursos dedicados. Essas fábricas dedicadas são chamadas de “fábricas virtuais”, devido sua organização temporária e variável (Pithon, 2004).

Os processos responsáveis pela produção do produto podem ser divididos em tarefas ou elementos e reorganizados de uma forma mais eficiente. Essas tarefas, chamadas de “recursos primitivos”, podem estar distribuídas globalmente em empresas distintas, formando uma rede de empresas que conecta seus recursos primitivos através de uma tecnologia de transmissão de dados (Cunha & Putnik, 2006).

O conjunto de empresas e seus recursos primitivos é chamado de “domínio”. Quanto maior for a amplitude do domínio, maior será a gama de soluções possíveis para um produto, porém também exigirá melhores tecnologias de apoio a decisão devido a estruturas mais complexas e reconfigurações em tempo real (Putnik & Silva, 1995; Pithon, 2016). A Figura 2 demonstra o processo de seleção de recursos primitivos de um domínio para a formação de uma série de fábricas virtuais dedicadas a um produto cada – ou um sistema OPIM.

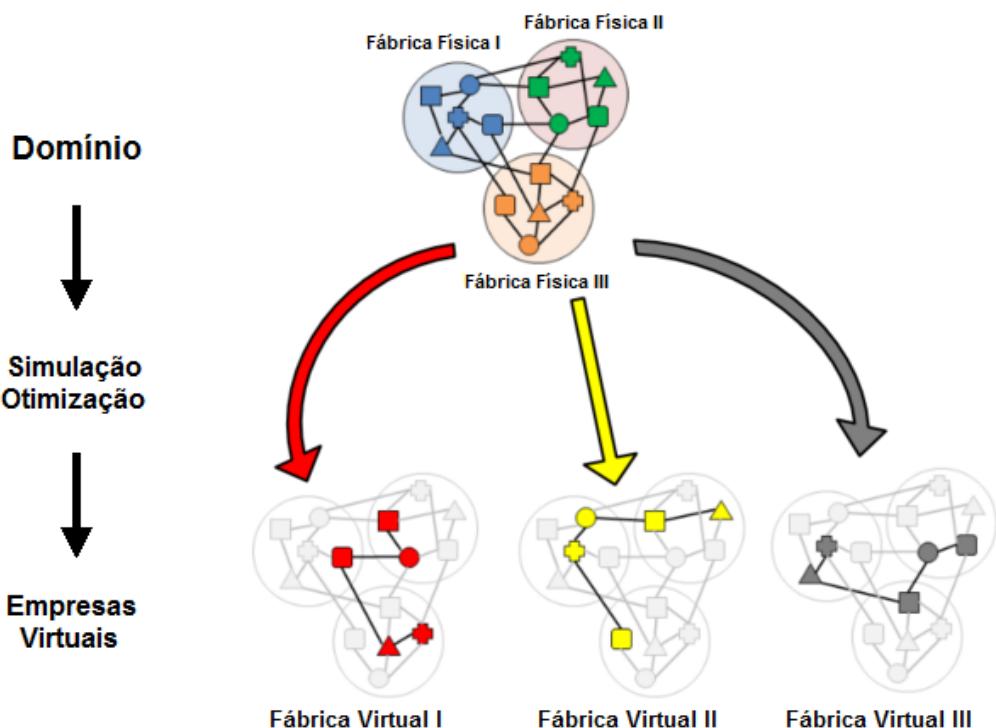


Figura 2. Seleção de recursos primitivos para sistemas OPIM. Adaptado de Cunha e Putnik (2006).

Putnik e Silva (1995) afirmam que cada célula de recurso primitivo é especializada em um tipo de serviço – design, planejamento, gerenciamento ou manufatura – e devido às tecnologias de informação, as funções de design, planejamento e gerenciamento não dependem da distância entre os recursos.

Entre os benefícios de um sistema OPIM para as empresas estão a reengenharia dinâmica dos processos de negócio e o fortalecimento da competitividade através do acesso a novos

recursos, serviços e conhecimentos de outras empresas da rede, além da descentralização e melhor distribuição do negócio. Microempresas e empreendedores individuais podem se beneficiar do OPIM ao se integrarem em redes de empresas de maior porte, aproveitando de sua cadeia logística e de produção para se desenvolver mesmo estando instalado em fábricas de baixo investimento.

3. Análise baseada em simulação

A simulação é uma ferramenta de suporte a pesquisas e projetos de sistemas complexos que não podem ser validados por modelos analíticos exatos, onde variáveis estocásticas e incertezas são relevantes para o resultado final (Kelton *et al.*, 2011). A modelagem convencional utilizando parâmetros determinísticos nem sempre é segura devido a distribuições de probabilidade desconhecidas. A simulação com lógica difusa permite a modelagem das incertezas de sistemas reais (Azadeh *et al.*, 2012).

Robinson (2014) lista uma série de vantagens do uso da simulação na análise de operações de sistemas, incluindo menores custos e tempo de experimentos em comparação com sistemas reais, total controle das condições, modelagem da variabilidade, além de ser possível simular sistemas que ainda não existem no mundo real. Simulação é uma ferramenta ideal para o estudo de teorias relativamente recentes, como empresas virtuais e produção compartilhada.

Este trabalho utiliza a taxa de atendimento dos pedidos em função do tempo *takt* como parâmetro de comparação. Sendo tempo *takt* o tempo disponível de produção dividido pelo número médio de pedidos, a taxa de atendimento é a porcentagem desses pedidos que são entregues ao cliente final.

3.1. Modelo conceitual

A Figura 3 a seguir apresenta como é realizado o processo de otimização de um modelo OPIM baseado em simulação. Após identificar os recursos primitivos das três fábricas, o software de simulação reorganiza estes recursos formando uma fábrica virtual para cada produto e calcula o nível de atendimento da fábrica. Esse processo de simulação dura uma fração de segundo e, quando termina, os recursos são reorganizados novamente em uma diferente configuração e um novo nível de atendimento da demanda é calculado.

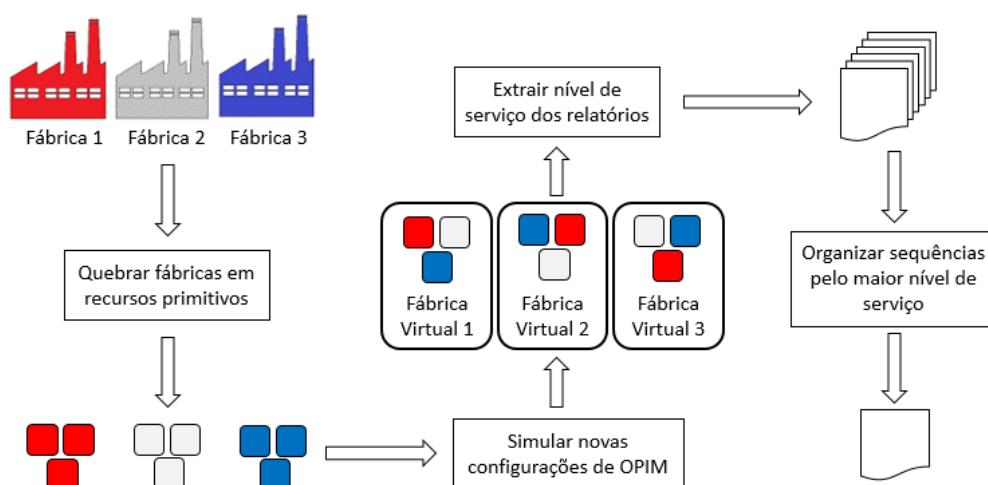


Figura 3. Modelo conceitual

Essas iterações têm a função de testar todas as configurações possíveis de fábricas virtuais antes de uma delas ser escolhida para a implementação real. Explorando os relatórios de resultados, são retirados importantes indicadores para a análise de melhoria, como nível de serviço e utilização da capacidade de cada cenário, além de alguns fatores que alteram os valores desses indicadores.

3.2. Simulação-otimização de OPIM

O sistema modelado consiste em três fábricas que produzem uma linha de três produtos e cada produto possui um cliente final e um fornecedor de matéria-prima. Antes de se tornar um produto final, a matéria-prima precisa passar por três processos distintos que podem ser realizados em qualquer uma das três fábricas. Todos os fornecedores possuem seu veículo para transportar a matéria-prima para as fábricas, assim como cada fábrica possui um veículo para transportar o produto acabado para o cliente e eventualmente produtos semiacabados entre as fábricas.

O fator relevante para a análise é que uma fábrica possui especialidades e competências diferentes das outras, o que significa que um processo específico pode ser mais eficiente em uma determinada fábrica ou uma fábrica pode ter mais experiência em uma determinada etapa da manufatura de um produto. Os sistemas de produção colaborativa têm o intuito de explorar a expertise dos parceiros e maximizar a eficiência produtiva, portanto a simulação dos sistemas tem o objetivo de identificar a maneira mais eficiente de explorar estes recursos.

A simulação de processos também considera as variáveis estocásticas do sistema. Neste caso, a estocasticidade está presente nos tempos de manufatura dos produtos, na demanda e no tempo de viagem dos veículos. Mesmo que o tempo entre um pedido e outro seja igual ao tempo médio de manufatura destes pedidos, gargalos e períodos de ociosidade impedem que o sistema produtivo consiga atender a demanda. Este efeito é observado nos dois modelos de cadeia de empresas utilizados na análise.

3.3. Modelo padrão

No modelo padrão, os clientes escolhem aleatoriamente um fabricante que ficará responsável por todos os três processos daquele lote de produtos. Ou seja, uma fábrica é completamente independente das outras e sua maior preocupação é atender a demanda estocástica.

Isso pode ser visto como um modelo tradicional, onde os três fabricantes competem dentro de um mesmo mercado. Apesar de estarem produzindo os mesmos produtos com a mesma qualidade, as diferentes competências de cada fabricante geram diferentes níveis de eficiência produtiva. São três fornecedores e clientes neste exemplo, um para cada produto específico, porém modelar uma cadeia de suprimentos com um número maior ou menor de fornecedores e clientes segue a mesma lógica de programação. A maior diferença seriam as rotas que os veículos escolhem que possuirão distâncias diferentes, impactando na disponibilidade dos veículos e, consequentemente, na capacidade de atendimento dos fabricantes. Assim como também é possível alterar a quantidade de fabricantes, veículos e tipos de produtos dependendo da necessidade do trabalho.

A Tabela 1 apresenta os tempos dos processos dos lotes de produtos nas fábricas em horas, enquanto a Figura 4 mostra a demanda média em horas dos lotes. Esses dados são usados como *input* no modelo de simulação que, a partir de 1.000 iterações por cenário, obteve como

resultado a taxa de atendimento para os níveis de demanda simulados. Como demonstrado na Figura 4, mais de 99% dos pedidos daquele período são atendidos caso o tempo *takt* de cada produto seja de 2,5 horas por lote. O período usado na simulação foi de cinco dias, além de mais um dia extra de *warm-up*.

Tabela 1. Tempo médio de processo de um lote de produtos em horas.

		PRODUTO 1	PRODUTO 2	PRODUTO 3
FÁBRICA 1	Processo 1	1,10	1,08	1,49
	Processo 2	0,71	0,70	0,96
	Processo 3	1,16	1,14	1,56
FÁBRICA 2	Processo 1	1,98	2,03	1,49
	Processo 2	0,71	0,73	0,53
	Processo 3	1,11	1,14	0,83
FÁBRICA 3	Processo 1	1,98	1,08	1,43
	Processo 2	1,34	0,73	0,96
	Processo 3	1,16	0,63	0,83

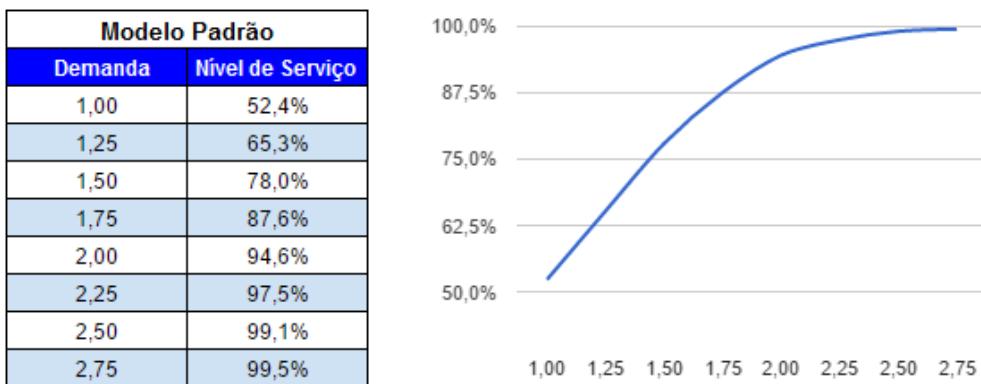


Figura 4. Taxa de atendimento ao cliente em função do *takt time* no modelo padrão.

3.4. Otimização baseada em simulação

A etapa seguinte é analisar o comportamento de um modelo cooperativo de produção em que os três fabricantes operam sob uma mesma marca e têm funções específicas para cada produto. Esse modelo cooperativo possui os mesmos *inputs* do modelo padrão, com exceção da sequência de produção. Enquanto no modelo padrão o produto segue através dos três processos da fábrica escolhida pelo cliente, no modelo cooperativo os produtos seguem uma rota específica podendo passar por qualquer dos três fabricantes. Essa rota busca otimizar a taxa de atendimento ao cliente tendo como restrições as capacidade de produção e transporte dos recursos.

A otimização é realizada pelo OptQuest, um *add-in* do Simio que manipula parâmetros de controle vinculados à sequência de produção, gerando milhares de cenários diferentes. Os parâmetros também geram um código para cada cenário, como exemplificado na tabela 2, onde as cores e os números representam em qual fábrica será realizado cada processo.

Após a simulação de todas as possíveis sequências de produção com o OptQuest, foi identificado que a sequência #12285 possui a melhor taxa de atendimento ao cliente para

cenários em que os três produtos possuem o mesmo tempo *takt*. A figura 5 mostra a comparação do sistema padrão de três competidores com uma empresa virtual de três parceiros seguindo o plano de produção #12285.

Tabela 2. Sequência de produção #12285.

	PRODUTO 1	PRODUTO 2	PRODUTO 3
PROCESSO 1	Fábrica 1	Fábrica 3	Fábrica 2
PROCESSO 2	Fábrica 1	Fábrica 2	Fábrica 3
PROCESSO 3	Fábrica 1	Fábrica 3	Fábrica 2

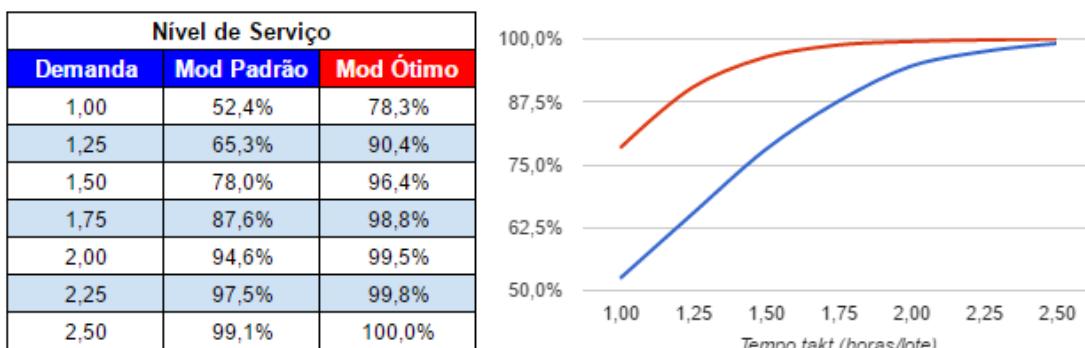


Figura 5. Comparação das taxas de atendimento dos modelos padrão e otimizado.

4. Análise dos resultados

Como a Fábrica 1 possui menores tempos de produção para o Produto 1 em relação às outras duas fábricas, a otimização buscou por sequências que dedicassem a capacidade da Fábrica 1 na produção do Produto 1. Para os outros dois produtos, nenhuma das fábricas possuem uma eficiência de produção consistente em todos os três processos, logo torna-se mais vantajoso transportar o produto semiacabado para a fábrica que realize o próximo processo mais eficientemente.

Em um sistema OPIM, cada etapa da produção (ou recurso primitivo) pode ser estudada como um subsistema independente dos outros recursos. A tabela 3 a seguir apresenta os tempos médios em horas que os produtos semiacabados esperaram no *buffer* da máquina antes de ser processado, retirados do relatório de simulação. Esses tempos de espera são consequência de longos tempos de processo, vistos anteriormente na tabela 1, pois processos mais demorados tendem a gerar gargalos nos estoques pré-processo.

Tabela 3. Tempo médio de espera dos produtos no *buffer* (em horas).

		PADRÃO	ÓTIMO
FÁBRICA 1	Processo 1	3,09	5,33
	Processo 2	1,12	2,56
	Processo 3	2,74	4,17
FÁBRICA 2	Processo 1	8,10	7,30
	Processo 2	0,52	0,36
	Processo 3	1,07	0,98
FÁBRICA 3	Processo 1	5,05	4,60
	Processo 2	1,75	0,47
	Processo 3	0,84	0,73

Nota-se que o *buffer* do Processo 1 da Fábrica 2 é onde os produtos mais esperam até serem processados, por possuir maiores tempos de processo (ou em outras palavras, menor capacidade produtiva).

Aproveitando a facilidade do *software* de simulação em testar diferentes cenários, foi feito um novo teste com uma alteração no modelo para reduzir o tempo de espera antes do Processo 1 da Fábrica 2. Neste teste, cujo o resultado médio de 1.000 iterações está na tabela 4, duas entidades podem realizar o Processo 1 da Fábrica 2 ao mesmo tempo, como se uma segunda máquina fosse adquirida, efetivamente dobrando a capacidade produtiva.

Tabela 4. Tempo médio de espera após aumento da capacidade do Processo 1 da Fábrica 2.

		PADRÃO	ÓTIMO
FÁBRICA 1	Processo 1	4,11	5,33
	Processo 2	1,61	2,48
	Processo 3	3,47	4,13
FÁBRICA 2	Processo 1	1,67	1,34
	Processo 2	1,27	0,42
	Processo 3	2,06	2,13
FÁBRICA 3	Processo 1	6,88	4,63
	Processo 2	2,28	0,95
	Processo 3	0,98	0,81

Comparando os resultados antigos na tabela 3 com os resultados da melhoria da capacidade na tabela 4, houve uma redução de aproximadamente 80% do tempo médio de espera no *buffer* do primeiro processo da Fábrica 2 tanto no cenário padrão, quanto no cenário otimizado. A grande diferença é que no cenário padrão, todos os outros oito processos tiveram um aumento no tempo de espera no *buffer*, enquanto no cenário do sistema OPIM o tempo de espera antes do Processo 1 da Fábrica 2 teve uma significante redução sem alterar o tamanho dos *buffers* dos outros processos.

Isso é um reflexo da independência das máquinas dedicadas. Quando um gargalo é eliminado em um sistema de produção tradicional, apesar de uma melhoria em geral na capacidade de

atendimento da demanda, há um aumento no fluxo de produtos dentro da fábrica e consequentemente um maior esforço dos outros processos para suportar esse fluxo.

Um fenômeno parecido observado neste teste é o aumento da taxa de atendimento ao cliente por tipo de produto, cujos dados estão na tabela 5 a seguir. Em ambos os cenário, a soma da taxa média de atendimento dos três produtos é aproximadamente 30%, porém no sistema padrão esse aumento foi dividido entre os três produtos, pois como todas as fábricas são responsáveis pela produção todos os produtos. Aumentar a capacidade de apenas um processo afeta todos os outros. O contrário é observado no sistema OPIM, pois como o Processo 1 da Fábrica 2 foi dedicado para a produção do Produto 3, os 30% de aumento na taxa de atendimento ficaram concentrados no Produto 3.

Tabela 5. Taxa de atendimento da demanda por tipo de produto.

Produto	Capacidade Original	
	Padrão	Ótimo
Produto 1	52,3%	79,2%
Produto 2	51,7%	89,1%
Produto 3	52,0%	67,4%

Produto	Capacidade Aprimorada	
	Padrão	Ótimo
Produto 1	62,4%	79,7%
Produto 2	62,7%	87,2%
Produto 3	62,2%	98,1%

5. Conclusões

Quando se compara os resultados do sistema OPIM com o tradicional, nota-se que a melhoria na taxa de atendimento é muito mais significante em cenários com maior dificuldade de entrega, ou maior demanda. Porém uma maior garantia de que os pedidos serão entregues não representa necessariamente menores custos de produção. Não houve uma sólida redução de estoques e houve um aumento na utilização dos veículos de transporte, reduzindo sua disponibilidade.

A simulação computacional facilitou a identificação de um problema do sistema e permitiu testar uma possível correção imediatamente. Os resultados da simulação do modelo corrigido mostraram valores que não poderiam ser previstos com a mesma facilidade com outras ferramentas de melhoria. Porém para identificar a melhor solução de um problema, é necessário definir quais indicadores se busca otimizar.

A próxima etapa da pesquisa é adicionar um valor financeiro às operações do sistema. Quando os recursos estão vinculados aos custos de fabricação, é possível identificar novos indicadores e otimizar o sistema em função de outros objetivos. A simulação permitiria comparar o custo de produção e transporte com o custo de atrasos na entrega (ou de pedidos não atendidos) a fim de identificar a rota mais rentável.

Outros elementos que podem ser adicionados para aprimorar o modelo são taxas de refugo e retrabalho, custo dos *buffers* de produção e gestão do fluxo de informação através de um *broker*. Aumentar a fidelidade do modelo computacional em relação ao real aumenta a confiabilidade e a precisão da informação, porém também exige maior capacidade de processamento do computador. É necessário encontrar a melhor razão entre precisão e tempo disponível antes de iniciar uma simulação de processos.

Referências

- Azadeh, A.; Raoofi, Z.; Haghnevis, M.; Madadi, M. (2012). A unique fuzzy simulation approach for concurrent improvement of customer satisfaction in integrated information and production processes with ambiguity. *Concurrent Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 287-299.
- Cunha, M.M.; Putnik, G. (2006). *Agile virtual enterprises: implementation and management support*. IGI Global.
- Kelton, W.D.; Smith, J.S.; Sturrock, D.T. (2011). *Simio & simulation: Modeling, analysis, applications*. Learning Solutions.
- Pithon, A.J.C. (2004). Projeto Organizacional para a Engenharia Concorrente no Âmbito das Empresas Virtuais. Doctoral dissertation, *Universidade do Minho*.
- Pithon, A.J.C. (2016). Empresas Virtuais. *Revista Augustus*, Vol. 20, No. 40, pp. 9-27.
- Putnik, G.D.; Silva, S.C. (1995). One-product-integrated-manufacturing. In *Balanced Automation Systems*. Springer US, pp. 45-52.
- Robinson, S. (2014). Simulation: the practice of model development and use. *Palgrave Macmillan*.
- Tang, D.; Zheng, L.; Chin, K.S.; Li, Z.; Liang, Y.; Jiang, X.; Hu, C. (2002). E-DREAM: A Web-based platform for virtual agile manufacturing. *Concurrent Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 165-183.