

MÉTODOS DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO APLICADOS A INTERNALIZAÇÃO DE PROCESSOS PRODUTIVOS

Gustavo Furtado da Silva (UFSC) gustavofurtado2@gmail.com

Nelson Casarotto Filho (UFSC) ncasarottofilho@gmail.com

Resumo

Otimização de processos é uma das principais ferramentas quantitativas para tomada de decisões industriais. É utilizada no ajuste de processos em que uma série de parâmetros específicos são otimizados sem violar as restrições do sistema, onde os objetivos mais comuns são a minimização de custos e maximização de rendimento e/ou eficiência. Porém, métodos tradicionais de otimização não representam fielmente o sistema estudado, devido à complexidade da modelagem matemática e à estocasticidade das variáveis do sistema. Este artigo propõe dois métodos de otimização baseado em simulação como apoio à tomada de decisão em um processo de internalização de produtos, buscando prever mais precisamente o comportamento do sistema. Enquanto o primeiro método busca refinar a quantidade de produtos através de iterações até que a demanda seja satisfeita, o segundo cria módulos de produção, simula todas as configurações possíveis do e identifica o melhor resultado. Apesar dos dois métodos cumprirem o mesmo objetivo, sugerindo uma internalização parcial dos produtos para minimizar o custo total, os produtos propostos para a internalização variam de acordo com o método utilizado.

Palavras-Chaves: Terceirização; Internalização; Simulação; Otimização.

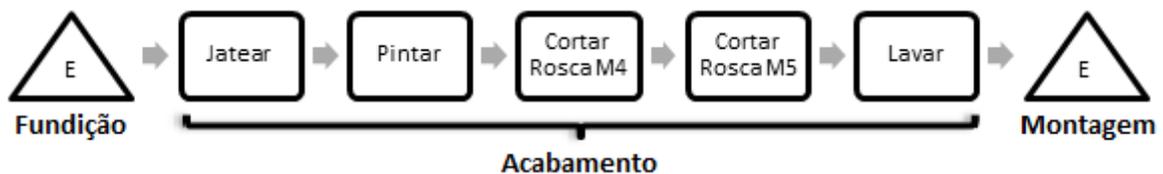
1. Introdução

Terceirização dificilmente deixará de ser uma tendência por ser um meio de redução de custo e desmobilização de capital investido; porém, quando se usa a terceirização apenas para realizar a mesma atividade a um menor custo, uma reorganização interna pode ser uma forma mais eficiente de se atingir esse objetivo (LACITY; HIRSCHHEIM, 1993a apud QUÉLIN; DUHAMEL, 2003, p. 648). Uma série de entrevistas e estudos conduzidos por Ralf Drauz (2014, p. 350) revelou que empresas do ramo automobilístico decidiram reinternalizar operações, devido, principalmente, à baixa utilização da capacidade após a crise econômica de 2007, e o principal método utilizado nessa tomada de decisão foi o de comparação de custos.

A empresa estudada neste trabalho terceirizava as operações de acabamento de uma linha de condutores de alumínio sem rosca (tipo CSR) com bitolas de 1.¼” (CSR-25), 1.½” (CSR-30), 2” (CSR-35) e 2.½” (CSR-40); porém, por possuir índices de eficiência superiores ao fornecedor, notou-se que o custo de produção interna era menor que o oferecido pelo fornecedor, por esse motivo foi resolvido que seria utilizado o máximo possível de sua capacidade ociosa na produção de peças anteriormente terceirizadas.

Os processos de acabamento internalizados estão representados na Figura 1. O setor de planejamento e controle da produção (PCP) envia uma ordem de produção, assim que as peças saem da fundição, conforme o plano de produção. Em lotes, as peças passam por um rotojato de granalhas de aço para melhorar a adesão da tinta em pó durante o processo seguinte de pintura. Em seguida, são levadas para uma célula de corte das roscas para parafusos M4 e M5 e, por fim, as peças são lavadas antes de serem enviadas para a montagem.

Figura 1 – Processo de acabamento de condutores sem rosca



Fonte: Silva et al. (p. 156, 2015)

1.1. Objetivo

O objetivo deste artigo é definir qual é a quantidade ideal de condutores que devem ser terceirizados ou produzidos internamente baseado nas informações retiradas do sistema gerencial da empresa. Para isso duas abordagens de otimização baseado em simulação são desenvolvidas a fim de comparar os resultados e a aplicabilidade.

2. Análise baseada em simulação

Simulação é uma ferramenta com a função de imitar um processo ou um sistema do mundo real (BANKS et al., p. 3, 2001). Para simular algo, primeiro é necessário que seja desenvolvido um modelo que represente as características principais ou os comportamentos de determinado sistema, físico ou abstrato. Enquanto o modelo representa o próprio sistema, a simulação representa as operações no sistema em função do tempo.

A simulação pode ser utilizada em muitos contextos, como simulação de tecnologia para otimização de desempenho, engenharia de segurança, treinamentos, educação e jogos eletrônicos. A simulação também pode ser usada para estudar as funcionalidades de um sistema natural ou humano, pode ser usada para demonstrar os efeitos de condições alternativas durante uma ação, assim como pode ser usada quando o sistema real não pode ser aplicado, por ser perigoso, inacessível, não estar pronto, ou simplesmente não existir (SOKOLOWSKI; BANKS, p. 6, 2009).

A manufatura representa uma das mais importantes aplicações da simulação, pois esta técnica é uma ferramenta valiosa usada por engenheiros para avaliar os efeitos do capital investido em equipamentos e instalações físicas, como fábricas, armazéns e centros de distribuição. A simulação pode ser utilizada para prever o desempenho de um sistema planejado e comparar soluções alternativas para algum problema de projeto (BENEDETTINI; TIAHJONO, 2009). Outro importante objetivo da simulação em sistemas de manufatura é quantificar o desempenho do sistema. Banks et al. (2005) cita as medidas de desempenho mais comuns para simulação de sistemas de manufatura:

- Rendimento sob demanda média ou picos de demanda;
- Tempo de ciclo do sistema;
- Utilização de recursos, máquinas e mão-de-obra;
- Gargalos;
- Filas e atrasos;
- Estoque necessário;
- Mão-de-obra necessária;
- Eficácia de sistemas de planejamento;
- Eficácia de sistemas de controle.

2.1. Abordagem híbrida de simulação-otimização

Modelos de otimização por programação linear têm o objetivo de minimizar o custo total de um horizonte de planejamento fixo, onde as restrições mais comuns são balanços de estoque, nível de produção, demanda e restrições de capacidade em cada período do horizonte de planejamento (BYRNE; HOSSAIN, p. 225, 2005). Já a simulação estocástica é uma poderosa ferramenta de modelagem para análise de sistemas complexos antes de sua implementação física e um método capaz de especificar com precisão sistemas logicamente complexos e variáveis e constantes não-algébricas (LIN; CHEN, p. 105, 2015).

Porém, além disso, existem métodos híbridos de simulação e otimização capazes de mensurar as incertezas no planejamento da produção sem comprometer a precisão das informações ou o tempo de processamento do computador. Otimização baseada em simulação é definida como uma otimização estocástica utilizando técnicas de simulação, ou o processo de identificar o melhor valor das variáveis de entrada sem uma avaliação explícita. É uma ferramenta de apoio à decisão capaz de detectar a iteração entre várias entidades de um sistema complexo real para identificar a melhor solução (LIN; CHEN, p. 105, 2015).

3. Desenvolvimento dos modelos de simulação-otimização

A seguir são apresentados os dois métodos de análise aplicados neste caso. Enquanto o primeiro método busca refinar a quantidade de produtos através de iterações até que a demanda seja satisfeita, o segundo cria módulos de produção, simula todas as configurações possíveis do sistema baseado nesses módulos e identifica o melhor resultado.

3.1. Método 1

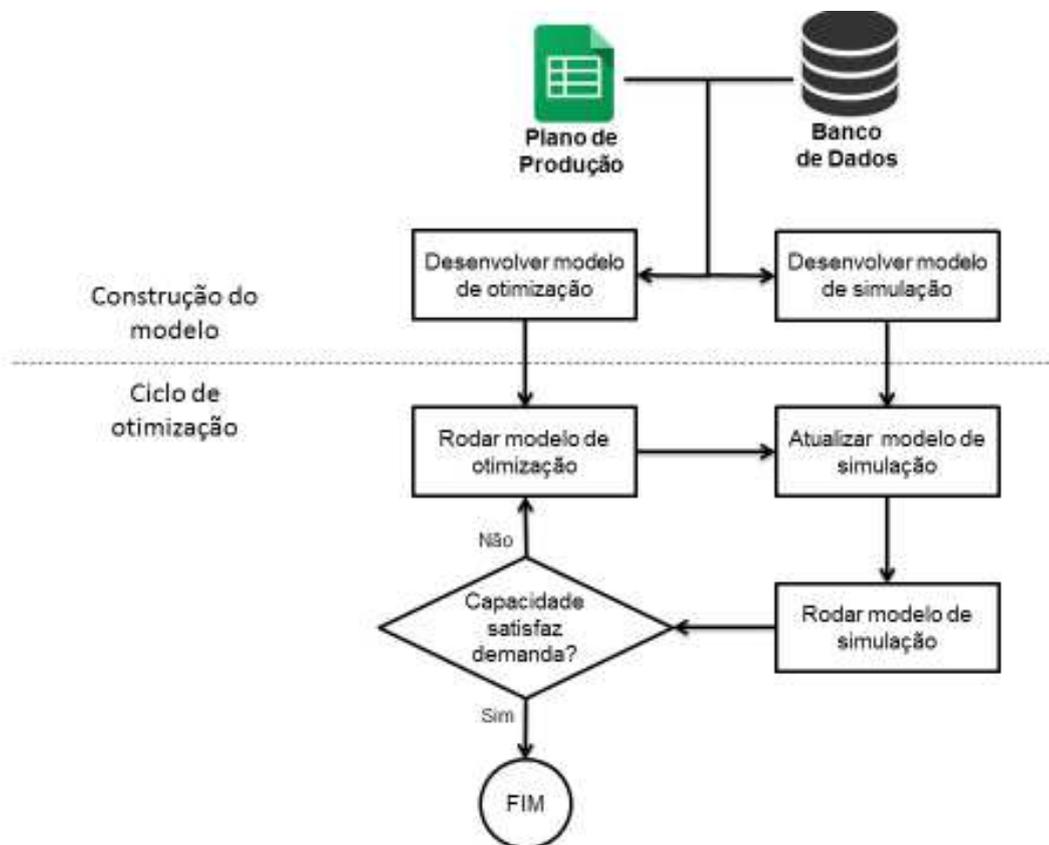
O primeiro método utiliza um software de simulação de eventos discretos para simular o processo de manufatura, enquanto a programação linear é realizada através de planilhas eletrônicas. Após a escolha dos softwares mais adequados, a modelagem do sistema é realizada com base nas informações do Anexo A extraídas de bancos de dados e do plano de produção apresentado no Anexo B.

Essas informações são utilizadas no desenvolvimento de um modelo de simulação apto a determinar se o sistema possui capacidade suficiente para produzir a quantidade de peças

definida na otimização considerando as variáveis estocásticas. A capacidade de produção disponível por processo pode ser vista no Anexo C.

Caso a demanda não seja atendida, o tempo consumido pela variabilidade do sistema é reduzido da capacidade disponível da programação linear, e uma nova iteração de otimização definirá uma nova quantidade de peças a serem produzidas. Por exemplo, caso o sistema só atenda 90% da demanda, uma nova simulação é realizada utilizando apenas 90% da quantidade de lotes da iteração anterior. Esse ciclo é repetido até que a capacidade seja suficiente para atender toda a demanda de peças produzidas internamente.

Figura 2 – Método 1 de otimização baseada em simulação



Fonte: Adaptado de Silva et al. (p. 158, 2015)

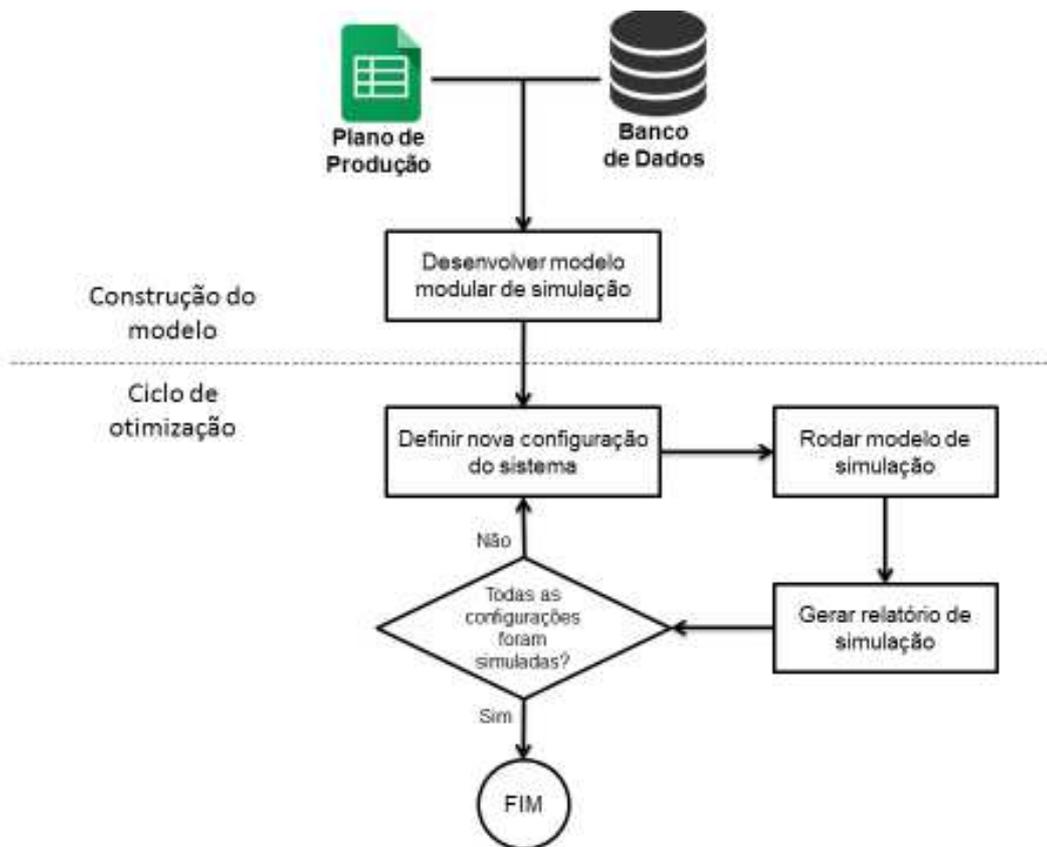
3.2. Método 2

Enquanto o Método 1 busca encontrar a quantidade ideal de lotes a ser terceirizada para cada produto, o Método 2 se baseia na ideia de recursos primitivos, uma espécie de módulo de produção utilizada na criação de fábricas virtuais para cada produto (PUTNIK; SILVA, 1995; PITHON, 2004; CUNHA; PUTNIK, 2006).

No caso deste trabalho, os processos internos de acabamento formam um recurso primitivo, enquanto os processos externos formam outro. Diferente do Método 1, cada produto está associado a apenas um recurso primitivo, logo todos os lotes desse produto devem ser produzidos na mesma fábrica.

Nesse método, a simulação também é realizada por um software de simulação de eventos discretos, porém a otimização é feita por um add-in desse mesmo software, portanto só é desenvolvido um modelo de simulação em um único programa. O programa lista e simula todas as configurações possíveis e depois identifica a configuração com o menor custo total de produção que atenda 100% da demanda. Os dados de produção do Método 2 são os mesmos do Método 1, disponíveis nos Anexos.

Figura 3 – Método 2 de otimização baseada em simulação



Fonte: Adaptado de Silva et al. (p. 158, 2015)

3.3. Modelagem matemática

O objetivo da programação linear é minimizar o custo de produção do setor de acabamento, mas primeiro é necessário definir qual é a função que melhor representa esse custo. A partir

dos estudos de Caputo e Palumbo (2005), Wu et al. (2013) e Zhen (2014), foi identificado que os fatores que devem ser considerados durante a programação linear são: Investimentos iniciais, recursos humanos, estudos de tempos e métodos, custos operacionais, demanda, capacidade produtiva, custos logísticos e produtos atrasados/rejeitados.

Considerando todos esses fatores, pode-se definir a função objetivo da otimização. Neste caso, o objetivo será minimizar os custos de produção interna e externa de todos os produtos somados conforme a equação a seguir, em que:

- **z** Função objetivo, soma dos custos internos e externos;
- **i** Identificação dos produtos CSR-25, CSR-30, CSR-35 e CSR-40;
- **I** Total de produtos diferentes;
- **n_i** Quantidade de produtos **i** produzidos internamente;
- **m_i** Quantidade de produtos **i** terceirizados;
- **α_i** Custo para realizar os processos do produto **i** internamente;
- **β_i** Custo dos processos terceirizados do produto **i**.

$$\min z = \sum_{i=1}^I (n_i \times \alpha_i) + \sum_{i=1}^I (m_i \times \beta_i)$$

A partir desta função, é necessário definir o que compõe os custos **α** e **β**. O custo de um item produzido internamente pode ser separado em custo fixo e custo variável. O custo variável é um valor individual de cada produto, pois é proporcional a suas características, como o tempo de ciclo, matéria-prima ou a energia gasta na produção.

$$\alpha_i = cv_i + cf_i$$

Os custos fixos são valores que não se alteram com o nível de produção, como o aluguel das instalações ou o salário de algumas equipes de suporte. Esses valores são adicionados a um centro de custo que irá ratear o custo ponderadamente entre as operações dentro desse centro. A fração do custo fixo que cada produto irá receber dependerá da quantidade de itens já associados a esse centro de custo mais os itens que serão definidos durante a otimização, conforme a equação a seguir, na qual:

- **cv** Custo variável do item **i**;
- **cf** Fração do custo fixo recebido pelo item **i** após o rateio;

- **CF** Custo fixo total designado ao centro de custo do acabamento;
- **p** Processo de um total de **P** processos;
- **tc** Tempo de ciclo do item **i** no processo **p**;
- **TC** Soma dos tempos de ciclo de todos os outros itens do centro de custo.

$$cf_i = \frac{CF}{TC + \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P (n_i \times tc_{ip})} \times \sum_{p=1}^P (n_i \times tc_{ip})$$

Uma importante restrição, conforme mencionado anteriormente, é a capacidade de produção interna, que será o tempo, em horas-homem, que cada máquina tem disponível para realizar sua respectiva operação. A inequação mostra que a capacidade disponível para o processo **p** deve ser maior que a soma dos tempos de ciclo de todos os itens **i** que serão processados naquela máquina. Cada máquina gera uma nova restrição.

$$Capacidade_j \geq \sum_{i=1}^I (n_i \times tc_{ip})$$

O sistema deve obrigatoriamente atender a demanda do cliente, no caso, o setor de montagem, e cada item **i** terá sua restrição, em que a demanda será menor ou igual a soma dos produtos fabricados interna e externamente, conforme apresentado a seguir.

$$Demanda \leq n_i + m_i$$

Há ainda restrições necessárias para que a programação esteja matematicamente viável. As quantidades **n** e **m** para todos os itens **i** processados devem ser um valor inteiro maior ou igual a zero.

$$\{n, m\} \in \mathbb{N}$$

Nos dois métodos o sistema é modelado de forma idêntica utilizando os dados de produção disponíveis nos Anexos, retirados do sistema gerencial da empresa. O processo de pintura possui uma probabilidade de falha de 2%, necessitando que o produto seja retrabalhado em seguida.

Serão considerados quatro produtos de uma linha de condutores que são movimentados e produzidos em lotes de 50 peças. Conforme o volume de produção vai se alterando, o custo do processo de fabricação associado às peças é alterado também. A programação também

busca a melhor utilização da capacidade disponível de cada máquina. Como todas as peças compartilham a mesma máquina, a otimização tenta alocar as peças com menor custo/tempo nas máquinas internas e envia as menos eficientes para terceirização.

Outro fator a ser levado em consideração é a distância entre as duas fábricas. A fábrica principal está localizada no distrito industrial de Joinville-SC, enquanto a segunda fábrica que disponibilizará a capacidade, caso seja necessário, está localizada em Garuva-SC. Buscando pelos endereços através do *website* Google Maps, foi identificado que a distância entre as duas fábricas é de 29,9 quilômetros, ou 26 minutos em trânsito normal.

4. Resultados

A seguir são apresentados os resultados das otimizações, seguido por uma comparação entre os métodos propostos.

4.1. Resultados do Método 1

Os resultados iniciais da primeira iteração da programação linear são utilizados para alimentar o modelo no *software* de simulação, que realizou cem replicações com esses valores para gerar o relatório. Dos 131 lotes que entraram no acabamento, apenas 115 saíram para a montagem, onde o gargalo foi as rosqueadeiras, porque a programação linear não forneceu uma margem grande o suficiente para comportar a variação da produção dentro da capacidade.

A quantidade de lotes produzidos com sucesso gerou uma porcentagem que representa a taxa de atendimento daquele processo em função da quantidade inicialmente proposta na programação linear. Essa taxa, quando multiplicada pela capacidade disponível, gera uma nova capacidade não contendo o tempo reservado para a estocasticidade da iteração anterior.

Quadro 1 – Taxa de atendimento da primeira iteração

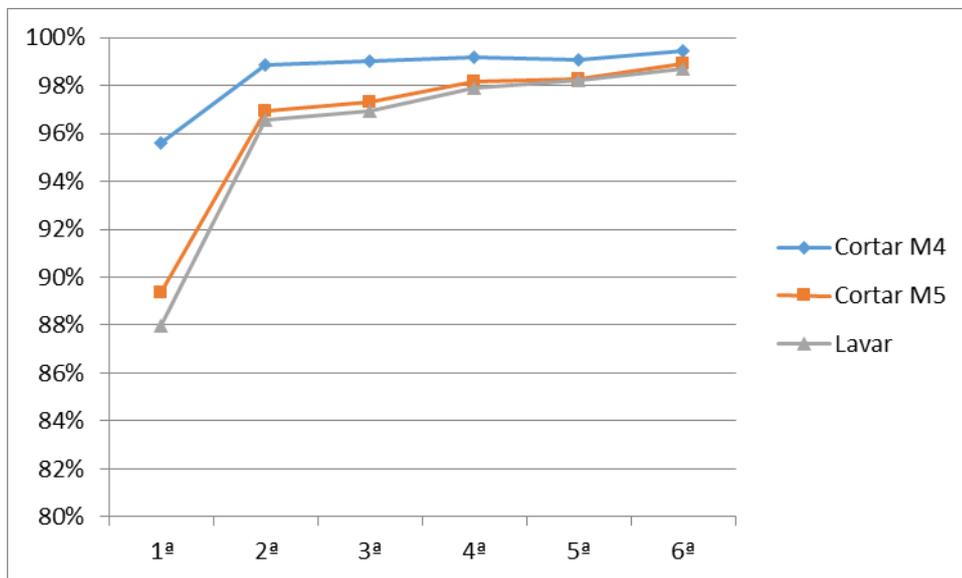
	CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40	TOTAL	Disp.	Atend.
Jatear	11780	0	20910	5250	37560	57600	100%
Pintar	4500	0	3825	840	9165	14400	100%
Cortar M4	16500	0	14025	1925	32450	41307,11	96%

Cortar M5	15000	0	12750	1750	29500	38612,89	89%
Lavar	8700	0	14280	2240	25220	25339,6	88%

Fonte: Silva et al. (p. 163, 2015)

Na segunda iteração, a programação é resolvida utilizando a capacidade ajustada como restrição, obtendo uma nova quantidade de lotes a serem simulados. Cada iteração gera uma taxa de atendimento superior a anterior, formando uma assíntota na reta igual a 100%.

Figura 4 – Evolução da taxa de atendimento



Fonte: Silva et al. (p. 163, 2015)

A tabela abaixo mostra uma comparação da quantidade de lotes processados internamente, da taxa de atendimento de cada processo e do custo total (incluindo o custo das peças terceirizadas) entre a primeira e a sexta iteração da abordagem.

Quadro 2 – Comparação entre primeira e sexta iterações

1ª iteração		6ª iteração	
	Atendimento		Atendimento
Jatear	100,00%	Jatear	100,00%
Pintar	100,00%	Pintar	100,00%
Cortar M4	95,62%	Cortar M4	99,43%
Cortar M5	89,38%	Cortar M5	98,94%

Lavar	87,98%	Lavar	98,72%
Qtde. Lotes	131	Qtde. Lotes	109
Custo Total	110.458,01	Custo Total	111.124,40

Fonte: Silva et al. (p. 163, 2015)

A abordagem híbrida ajustou a quantidade de lotes produzidos internamente para que o sistema atendesse toda a demanda considerando as possíveis variações durante o processo. Reduzir a quantidade de lotes produzidos internamente, e conseqüentemente aumentar a quantidade terceirizada, alivia a operação gargalo, porém aumenta a ociosidade das máquinas que realizam as operações que já atendiam a demanda. O modelo definiu estatisticamente que o impacto da ociosidade no custo total é pouco relevante para a garantia do atendimento. Sem o uso da abordagem, seria necessário utilizar uma margem de segurança, muitas vezes definida arbitrariamente e sujeita a erros, que garantisse uma alta taxa de atendimento.

4.2. Resultados do Método 2

O resultado final do processo de otimização do Método 2 está disponível no **Apêndice A**. O modelo possui quatro produtos que poder ser produzidos em duas fábricas, logo o total de configurações possíveis para esse modelo é 16. Foi realizada a simulação de todas essas configurações e os resultados foram ordenados de acordo com o custo total de produção.

Os seis cenários com os menores custos não atendem a 100% da demanda, portanto o custo real será maior que o obtido depois de considerar os custos de atraso de entrega. A primeira configuração que atende completamente a demanda é a **Sequência #13**, que sugere que os produtos CSR-25 e CSR-30 sejam produzidos na fábrica em Garuva, enquanto os produtos CSR-35 e CSR-40 sejam produzidos em Joinville.

A decisão de qual produto permanecerá em Joinville é justificado no Quadro 3. O produto CSR-35 é o que tem o maior aumento de custo quando é produzido em Garuva, então a programação sugere que sejam transportados produtos com uma menor diferença de custo entre as duas fábricas.

Porém a restrição de capacidade produtiva impede que os produtos CSR-25 ou CSR-30 sejam produzidos juntos com o CSR-35 em Joinville. Não há capacidade suficiente para uma quantidade tão alta de unidades, então o produto CSR-40 é o escolhido para ser produzido

junto com o CSR-25 por ser o único que exige uma capacidade menor que a restante disponível.

Quadro 3 – Diferença dos custos internos e externos de fabricação

	CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Joinville	4,79	5,20	6,01	14,37
Garuva	5,71	6,09	7,54	16,30
Diferença	+19%	+17%	+25%	+13%

4.3. Comparação dos métodos

Os Quadros 4 e 5 apresentam uma comparação entre o resultado do processo de otimização dos dois métodos. Enquanto o Quadro 4 mostra a quantidade de produtos designada para cada fábrica, o Quadro 5 mostra o custo total de produção das duas fábricas.

Quadro 4 – Quantidade de unidades produzidas internamente e terceirizadas

		CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Método 1	Joinville	3100	0	2000	350
	Garuva	22	5754	5586	28
	TOTAL	3122	5754	7586	378
Método 2	Joinville	0	0	7586	378
	Garuva	3122	5754	0	0
	TOTAL	3122	5754	7586	378

Quadro 5 – Resultado da simulação dos modelos original e revisado

		CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40	TOTAL
Método 1	Joinville	14.849,00	-	12.020,00	5.029,50	31.898,50
	Garuva	125,62	35.041,86	42.118,44	456,40	77.742,32
	TOTAL	14.974,62	35.041,86	54.138,44	5.485,90	109.640,82
Método 2	Joinville	-	-	45.591,86	5.431,86	51.023,72
	Garuva	17.826,62	35.041,86	-	-	52.868,48
	TOTAL	17.826,62	35.041,86	45.591,86	5.431,86	103.892,20

Nota-se nesses últimos quadros que o custo total dos processos de acabamento utilizando o novo método foi 5,24% menor que o método original. Isso se deve à natureza dos *softwares* usados no processo de otimização.

O Método 1 utilizou o Solver, um *add-in* do Microsoft Excel, para resolver a programação linear. Foi escolhida aleatoriamente uma das variáveis de controle e feita a otimização a partir dela. É possível que o resultado seja melhor caso a otimização se inicie com outra variável, mas o Solver geralmente descarta opções que inicialmente tenham um pior resultado, mesmo que o resultado seja melhor no longo prazo.

O Método 2 testou todas as configurações possíveis através do OptQuest, um *add-in* desenvolvido para *softwares* de simulação de eventos. Com ele foi possível ordenar os cenários em função do custo total e filtra-los caso a demanda não tivesse sido atendida.

Pode-se observar que uma outra característica do Método 2 em relação ao Método 1 é o processo estar associado exclusivamente a um recurso primitivo. Nos primeiros resultados, uma parte dos lotes de CSR-35 foi terceirizada, enquanto a outra parte foi internalizada. Já nos resultados do Método 2, os produtos tiveram sua produção 100% terceirizada ou 100% internalizada, não houve uma tentativa de equilíbrio.

5. Conclusões

Uma das funções da simulação de processos é produzir uma alta quantidade de dados sem a necessidade de análises empíricas e é uma solução alternativa às ferramentas mais caras e/ou menos precisas. Este artigo mostra que abordagens de simulação-otimização podem também ser utilizadas para aumentar a confiabilidade de uma proposta. Um método de otimização pura, por não apresentar as variáveis estocásticas do sistema, obteria resultados que, caso fossem implementados, gerariam uma taxa de atendimento abaixo do mínimo aceitável. Ao adicionar um método de simulação à abordagem, foram identificados os gargalos do sistema e os lotes foram realocados para aproximar a taxa de atendimento a 100%.

O caso deste artigo busca não apenas contribuir para a eficiência das estratégias de terceirização, mas também incentivar a utilização de métodos de simulação-otimização em diferentes pontos da cadeia de suprimentos. A cada ano que passa, a importância da

tecnologia na competitividade da empresa aumenta e o artigo apresenta duas propostas seguras e eficientes de tecnologia, reduzindo a necessidade de dados empíricos no processo de decisão.

REFERÊNCIAS

- BANKS, Jerry. et al. **Verification and validation of simulation models**. Discrete-event system simulation, 3rd Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River (NJ), p. 367-397, 2001.
- BANKS, Jerry et al. **Discrete-event system simulation**. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.
- BENEDETTINI, Ornella; TIAHJONO, Benny. Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 43, n. 1-2, p. 191-199, 2009.
- BYRNE, M. D.; HOSSAIN, M. M. Production planning: An improved hybrid approach. **International Journal of Production Economics**, v. 93-94, p. 225-229, 2005.
- CAPUTO, Antonio C.; PALUMBO, Mario. Manufacturing re-insourcing in the textile industry: A case study. **Industrial Management & Data Systems**, v. 105, n. 2, p. 193-207, 2005.
- CUNHA, Maria Manuela; PUTNIK, Goran. D. One Product Integrated Manufacturing. In: **Agile Virtual Enterprises: Implementation and Management Support**. Hershey, PA: Idea Group Publishing, p. 43-45, 2006.
- DRAUZ, Ralf. Re-insourcing as a manufacturing-strategic option during a crisis—Cases from the automobile industry. **Journal of Business Research**, v. 67, n. 3, p. 346-353, 2014.
- LIN, James T.; CHEN, Chien-Ming. Simulation optimization approach for hybrid flow shop scheduling problem in semiconductor back-end manufacturing. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 51, p. 100-114, 2015.
- QUÉLIN, Bertrand; DUHAMEL, François. Bringing together strategic outsourcing and corporate strategy: Outsourcing motives and risks. **European management journal**, v. 21, n. 5, p. 647-661, 2003.
- Sokolowski, J.A.; Banks, C.M. **Principles of Modeling and Simulation**. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- PITHON, A. J. C. **Projeto Organizacional para a Engenharia Concorrente no Âmbito das Empresas Virtuais**. 2004. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade do Minho. Guimarães: 2004.
- PUTNIK, G. D.; SILVA, S. Carmo. One-product-integrated-manufacturing. In: AFSARMANESK, H. **Balanced Automation Systems: Architectures and Design Methods**. Springer US, p. 45-52, 1995.
- SILVA, Gustavo Furtado; FRAZZON, Enzo Morosini; CASAROTTO FILHO, Nelson. Proposta de método de otimização-simulação para apoiar a tomada de decisão em internalização de processos produtivos. **Exacta**, v. 13, n. 3, 2015.
- WU, Dexiang et al. Supply chain outsourcing risk using an integrated stochastic-fuzzy optimization approach. **Information Sciences**, v. 235, p. 242-258, 2013.

ZHEN, Lu. A three-stage optimization model for production and outsourcing under China's export-oriented tax policies. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 69, p. 1-20, 2014.

ANEXOS

Anexo A – Dados de produção dos processos de acabamento

		CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Demanda/mês		3122	5754	7586	378
Seg. / ciclo	Jatear	3,8	5,8	8,2	15,0
	Pintar	1,5	1,5	1,5	2,4
	Cortar M4	5,5	5,5	5,5	5,5
	Cortar M5	5,0	5,0	5,0	5,0
	Lavar	2,9	4,0	5,6	6,4

Fonte: Silva et al. (p. 165, 2015)

Anexo B – Plano de produção semanal

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
08:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
09:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
10:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
11:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
Almoço					
14:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar
15:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar
16:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar
17:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar

Fonte: Silva et al. (p. 165, 2015)

Anexo C – Capacidade disponível dos processos de acabamento

Capacidade disponível (seg.)	
Jatear	57600
Pintar	14400
Cortar M4	43200
Cortar M5	43200
Lavar	28800

Fonte: Silva et al. (p. 165, 2015)

APÊNDICES

Apêndice A – Comparação das taxas de atendimento e custos dos processos

	CSR-25		CSR-30		CSR-35		CSR-40		Custo Externo	Custo Interno	Custo Total
	Fábrica	Atend.	Fábrica	Atend.	Fábrica	Atend.	Fábrica	Atend.			
#16	Joinville	64,6%	Joinville	57,9%	Joinville	56,0%	Joinville	75,0%	R\$ -	R\$ 95.973,50	R\$ 95.973,50
#08	Joinville	67,6%	Joinville	59,5%	Joinville	57,2%	Garuva	100,0%	R\$ 6.128,80	R\$ 90.435,00	R\$ 96.563,80
#15	Garuva	100,0%	Joinville	74,9%	Joinville	69,6%	Joinville	75,0%	R\$ 17.815,20	R\$ 81.028,70	R\$ 98.843,90
#07	Garuva	100,0%	Joinville	75,0%	Joinville	73,2%	Garuva	100,0%	R\$ 23.944,00	R\$ 75.490,20	R\$ 99.434,20
#14	Joinville	98,6%	Garuva	100,0%	Joinville	84,7%	Joinville	100,0%	R\$ 35.029,70	R\$ 66.063,10	R\$ 101.093,00
#06	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	89,0%	Garuva	100,0%	R\$ 41.158,50	R\$ 60.524,60	R\$ 101.683,00
#13	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Joinville	100,0%	R\$ 52.844,90	R\$ 51.118,30	R\$ 103.963,00
#05	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	R\$ 58.973,70	R\$ 45.579,80	R\$ 104.554,00
#12	Joinville	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	R\$ 57.183,40	R\$ 50.393,70	R\$ 107.577,00
#04	Joinville	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	R\$ 63.312,20	R\$ 44.855,20	R\$ 108.167,00
#11	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	R\$ 74.998,60	R\$ 35.448,90	R\$ 110.447,00
#03	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	R\$ 81.127,40	R\$ 29.910,40	R\$ 111.038,00
#10	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	R\$ 92.213,00	R\$ 20.483,30	R\$ 112.696,00
#02	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	R\$ 98.341,80	R\$ 14.944,80	R\$ 113.287,00
#09	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	R\$ 110.028,00	R\$ 5.538,48	R\$ 115.567,00
#01	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	R\$ 116.157,00	-	R\$ 116.157,00