



Exacta

ISSN: 1678-5428

exacta@uninove.br

Universidade Nove de Julho

Brasil

Furtado da Silva, Gustavo; Morosini Frazzon, Enzo; Casarotto Filho, Nelson
Proposta de método de otimização-simulação para apoiar a tomada de decisão em
internalização de processos produtivos
Exacta, vol. 13, núm. 3, 2015, pp. 155-165
Universidade Nove de Julho
São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81044154001>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Proposta de método de otimização-simulação para apoiar a tomada de decisão em internalização de processos produtivos

A proposal for a simulation-optimization method to support decision-making in the internalization of production processes

Gustavo Furtado da Silva

Mestrando em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Florianópolis, SC [Brasil]
gustavofurtado2@gmail.com

Enzo Morosini Frazzon

Professor no Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Doutor em Engenharia de Produção pela Universität Bremen, Alemanha.
Florianópolis, SC [Brasil]

Nelson Casarotto Filho

Professor no Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Florianópolis, SC [Brasil]

Resumo

Terceirização é uma prática que pode resultar em vantagens econômicas e competitivas, caso sua aplicação seja avaliada considerando-se diferentes alternativas estratégicas, como, por exemplo, a produção interna. Neste artigo, é proposta a utilização de uma abordagem híbrida de simulação e otimização para analisar a internalização das operações do setor de acabamento de uma linha de condutores de alumínio. Objetivou-se identificar a quantidade ótima de lotes que devem ser processados internamente, de forma que 100% da demanda sejam atendidos. A otimização considera a capacidade produtiva como uma importante restrição, enquanto a simulação adiciona valores estocásticos ao modelo de produção para garantir a confiabilidade do plano de produção. Os resultados obtidos com a abordagem híbrida mostraram que a cada iteração do método a taxa de atendimento ao cliente se aproxima do objetivo com um baixo impacto nos custos finais.

Palavras-chave: Internalização. Otimização. Processos de acabamento. Simulação.

Abstract

Outsourcing is a practice that can result in economic and competitive advantages if its application is evaluated taking into account different strategic alternatives, such as internal production. This paper proposes the use of a hybrid approach of simulation and optimization for analyzing the internalization of finishing operations for aluminum conduit boxes. The goal is to find the optimal amount of product batches that should be internally processed in order to meet 100% of the demand. The optimization considers the machinery's capacity as a major constraint, while the simulation adds stochasticity to the plant model to ensure production plan reliability. The results show that, when using the hybrid approach, the rate of compliance with customer demand increased and approached the goal at each iteration of the method, with a low impact on the final cost.

Key words: Finishing processes. Internalization. Optimization. Simulation.

de atender toda a demanda em tempo hábil gerando o menor custo possível. A terceirização é uma forma de entregar uma grande quantidade de produtos sem precisar de um alto investimento em expansão da capacidade produtiva.

Quélin e Duhamel (2003, p. 654) afirmam, a partir de uma análise, que os critérios mais importantes para tomar a decisão de terceirizar são, respectivamente, redução dos custos operacionais, foco nas atividades principais e ganho de flexibilidade.

Casarotto Filho (2015) cita um modelo gráfico que representa a magnitude do valor agregado versus as etapas da cadeia de valor, é o da curva “U”, por vezes chamado de “*smile curve*”. Conforme a Figura 2, a curva U mostra que a maior agregação de valor está nas pontas da cadeia de valor, ou seja, no início, em que há a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico, o *design*, a criação; e, no fim, no qual estão o *marketing*, a marca, os esquemas de distribuição, a comercialização e os serviços associados. A parte central, a produção, seria a de menor agregação de valor, e o que não fosse o cerne da produção poderia ser repassada a terceiros. A empresa poderia, assim, concentrar-se nas funções que mais agregam valor.

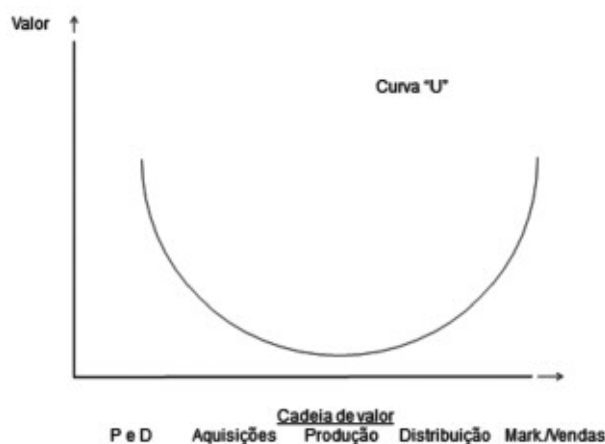


Figura 2: Gráfico etapas da cadeia de valor X magnitude da agregação de valor

Fonte: Casarotto Filho (2015).

Todavia, Drauz (2014, p. 343), em um estudo, identificou uma tendência das empresas de reinternalizar suas operações após a crise de 2007. Porém, comparados à terceirização, os motivos para reinternalizar são menos pesquisados, logo a literatura costuma usar as desvantagens da terceirização como pontos positivos da internalização.

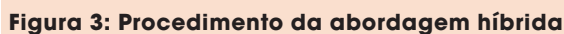
De acordo com as pesquisas de Drauz (2014), os fatores determinantes para esta decisão variam de acordo com sua estratégia de custo, qualidade, flexibilidade e dependência. As empresas buscam maior controle sobre as flutuações econômicas e a capacidade de produção das fábricas, assim como evitam custos inesperados de terceirização e perda de *know-how* dos funcionários.

Caputo e Palumbo (2005, p. 194) listam outras vantagens da internalização, como *buffers* para picos de demanda ou variação do *lead time*, melhor controle de qualidade, facilidade em desenvolver e testar novos produtos e maior agilidade em satisfazer pedidos de customização dos clientes. Os principais motivos dessas vantagens, segundo Quélin e Duhamel (2003, p. 656), são a dependência dos fornecedores e as limitações associadas a eles.

2.1 Metodologia da abordagem híbrida

Byrne (1999, p. 305) explica que abordagens tradicionais e analíticas geralmente falham em modelar a capacidade de maneira realística em virtude da complexidade em formular algumas características do sistema, como filas e estocasticidade. Assim, aplicar variáveis estocásticas em um modelo simples de otimização tende a gerar uma solução inadequada ou um tempo de solução inadequado (LAROQUE et al., 2012, p. 100). A abordagem híbrida é uma ferramenta que permite implementar incertezas no planejamento da produção sem comprometer a precisão das informações ou o tempo de processamento do computador.

Essas informações são utilizadas no desenvolvimento de um modelo de simulação apto a determinar se o sistema tem capacidade para produzir a quantidade de peças definida na otimização considerando as variáveis estocásticas. Caso ele não atenda, o tempo consumido pela variabilidade do sistema é reduzido da capacidade disponível da programação linear, e uma nova interação de otimização definirá uma nova quantidade de peças a serem produzidas. Esse ciclo



2.2 Custo de produção do setor de acabamento

2.2.1 Investimento inicial

2.2.2 Recursos humanos

2.2.3 Estudo de tempos e métodos

2.2.4 Custos operacionais

São os custos agregados ao produto durante a produção. Incluem o custo com mão de obra, manutenção, energia e amortização proporcionais ao tempo padrão da operação.

2.2.5 Demanda e capacidade

São as principais restrições do problema. É necessário balancear o nível de produção entre as plantas considerando suas respectivas capacidades de forma que a demanda seja atendida eficientemente.

2.2.6 Custos logísticos

Nesses custos estão incluídos os custos de logística interna (estoque, *work in process*) e os custos de transporte entre clientes e fornecedores. Em caso de fornecedores em outros países, devem-se somar as tarifas de importação.

2.2.7 Produtos atrasados e rejeitados

Fábricas diferentes possuem diferentes índices de qualidade e capacidade de entrega, e desvios de planejamento podem gerar custos relevantes o suficiente para que o risco de se produzir em outra fábrica seja considerado.

2.2.8 Centro de custo

Centros de custo são departamentos que não geram diretamente receita para a organização, mas agregam custos diretos e indiretos a atividades como *marketing*, contabilidade ou recursos humanos, com o intuito de estipular e organizar o orçamento dos setores da empresa. Na manufatura, os centros de custo incluem manutenção e controle de qualidade, além das próprias operações produtivas, de forma que os custos dos elementos que dão suporte à produção sejam agregados ao valor final do produto.

2.2.9 Função objetivo

Considerando todos os fatores listados, 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, em que

z é o custo total das operações internas e externas;

j é um item de um total de J itens;

n é a quantidade de itens j processados internamente;

m é a quantidade de itens j terceirizados;

α é o custo para realizar todas as operações internamente no item j ;

β é o custo para terceirizar as operações do item j .

$$\min z = \sum_{j=1}^J n_j \cdot \alpha_j + \sum_{j=1}^J m_j \cdot \beta_j$$

A partir desta função, é necessário definir o que compõe os custos α e β . O custo de um item produzido internamente pode ser dividido 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.

$$a_j = cv_j + cf_j$$

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 deste 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 é o custo variável do item j ;

cf é a fração do custo fixo recebido pelo item j após o rateio;

CF é o custo fixo total designado ao centro de custo do acabamento;

p é um processo de um total de P processos;

tc é o tempo de ciclo do item j no processo p ;
 TC é a soma dos tempos de ciclo de todos os outros itens do centro de custo.

$$cf_j = \frac{CF}{TC + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (n_j * tc_{jp})} * \sum_{p=1}^P (n_j * tc_{jp})$$

Vale ressaltar que essa é uma equação genérica que foi desenvolvida para atender cenários de baixa complexidade, cada caso exigirá formas distintas de extrair e interpretar os dados. No cenário em que estão sendo estudados, os dados são calculados e retirados do sistema de gerenciamento das empresas baseados principalmente no peso e no volume de cada peça; porém, outras empresas podem ter níveis de complexidade diferentes para seus processos e adaptações após análise, de modo que podem ser necessárias medidas complementares, como, por exemplo, expandir as fórmulas de custo variável ou custos logísticos.

2.2.10 Restrições

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 j que serão processados naquela máquina. Cada máquina gera uma nova restrição.

$$Capacidade_p \geq \sum_{j=1}^J n_j * tc_{jp}$$

O sistema deve obrigatoriamente atender a demanda do cliente, no caso, o setor de montagem, e cada item j terá sua restrição, em que a demanda será, conforme apresentado a seguir,

menor ou igual a soma dos produtos fabricados interna e externamente.

$$Demanda_j \leq n_j + m_j$$

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

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

Serão considerados quatro produtos de uma linha de condutores que são movimentados e produzidos em lotes de 50 peças. A análise é feita utilizando o Microsoft Solver que está programado para definir a quantidade de lotes que será processada internamente baseado no custo total de produção z , como definido antes.

Conforme o volume de produção vai se alterando, o custo do processo de fabricação associado às peças é alterado também.

Tabela 1: Custo do processo de acabamento em reais/peça

	CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Custo fixo	0,8131	0,9479	1,1218	1,4914
Custo variável	4,3010	5,0140	5,9340	7,8890
Custo interno	5,1141	5,9619	7,0558	9,3804

CSR: condutores sem rosca.

Além da redução de custo, a programação busca também 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.

2.3 Proposta em um cenário virtual controlado

A função da simulação é replicar uma proposta em um cenário virtual controlado, identi-

Tabela 2: Tempo necessário para produção interna

	CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40	TOTAL	Disp.
Jatear	11780	0	25420	5250	42450	57600
Pintar	4650	0	4650	840	10140	14400
Cortar M4	17050	0	17050	1925	36025	43200
Cortar M5	15500	0	15500	1750	32750	43200
Lavar	8990	0	17360	2240	28590	28800

CSR: condutores sem rosca; M4 e M5: especificação dos tipos de parafusos na empresa

ficando o comportamento do sistema para que a implantação no cenário real ocorra da forma mais eficiente possível. O modelo deste estudo foi construído com base nas informações do sistema de gerenciamento da empresa, como o sequenciamento das operações, o tempo padrão de produção e a taxa de retrabalho, buscando espelhar o chão de fábrica real. O modelo é alimentado com a quantidade de lotes obtida no processo anterior de otimização e simula a capacidade do sistema de produzir todos os lotes. O relatório da simulação apresenta uma quantidade de lotes produzidos diferente da obtida pela otimização e uma nova iteração é realizada com esta informação atualizada. Esta diferença é causada por valores estocásticos que não são considerados durante a etapa de melhoria.

2.4 Processos estocásticos

O principal objetivo da simulação nesta abordagem híbrida é avaliar o comportamento das variáveis estocásticas no sistema. Há várias incertezas dentro de um processo produtivo, incluindo carência de material, mudança de demanda ou faltas e atrasos de trabalhadores, mas é praticamente impossível incluir todos os fatores no planejamento (LAROQUE et al., 2012, p. 100). No atual estudo são analisados três tipos de processos estocásticos.

- Retrabalho: uma porcentagem das peças, geralmente fornecida pelo setor de qualidade, não atinge o padrão mínimo do produto final

em razão de uma falha ou má realização do processo, por exemplo, quando a tinta não cobre toda a superfície necessária durante o processo de pintura. O modelo deve enviar as entidades para o início do processo para serem retrabalhadas, considerando um novo tempo de transporte.

- Quebra de ferramental: utilizando informações fornecidas pelo setor de manutenção, é possível simular a frequência de quebra das máquinas e ferramentas e a duração do reparo. Deve-se considerar no desenvolvimento do modelo que o processo estará indisponível no decorrer desse período.
- Variabilidade do processo: pode depender de muitos fatores, como a complexidade das atividades, fadiga do operador ou nível de automação. Em um modelo de simulação é mais fácil representar o comportamento da variação por meio de distribuições estatísticas do que identificar as fontes da variação e adicionar ao modelo. Todavia, uma boa coleta de dados é necessária para definir a distribuição estatística que melhor representa o processo.

A ferramenta de simulação Arena apresenta uma interface intuitiva em que é possível construir e observar facilmente o fluxo de materiais entre os módulos e operadores lógicos. Após modelar processos, transporte e *schedule* de produção, é gerado um relatório que contém os valores mínimos, máximos e médios das replicações. A partir desse relatório, é feito o refinamento do



porque a programação linear não forneceu uma margem grande o suficiente para comportar a variação da produção dentro da capacidade.

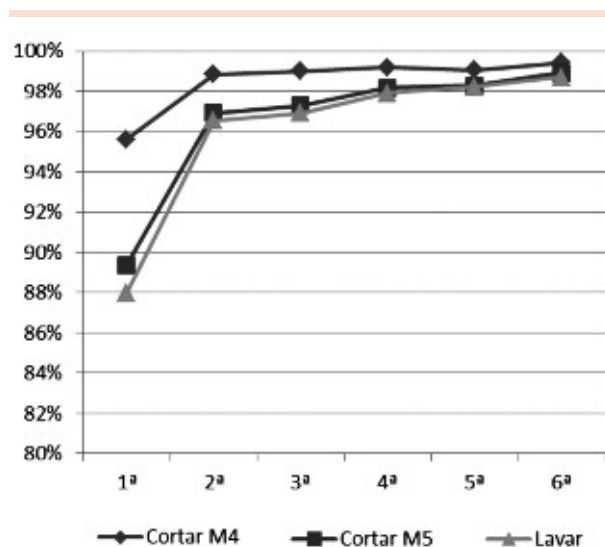
3 Resultados

Na segunda interação, a programação é resolvida utilizando a capacidade ajustada como

Tabela 3: Taxa de atendimento da primeira interação

	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	25339,60	88%

CSR: condutores sem rosca; M4 e M5: especificação dos tipos de parafusos na empresa.

**Figura 5: Evolução da taxa de atendimento**

M4 e M5: especificação dos tipos de parafusos na empresa.

restrição, obtendo uma nova quantidade de lotes a serem simulados no Arena. Cada interação gera uma taxa de atendimento superior a anterior, formando uma assíntota na reta igual a 100%.

A Tabela 4, a seguir, 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 interação da abordagem.

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

Tabela 4: Comparação entre primeira e sexta interações

	1ª interação Atendimento	6ª interação Atendimento
Jatear	100,00%	100,00%
Pintar	100,00%	100,00%
Cortar M4	95,62%	99,43%
Cortar M5	89,38%	98,94%
Lavar	87,98%	98,72%
Quant. lotes	131	109
Custo total	110.458,01	111.124,40

M4 e M5: especificação dos tipos de parafusos na empresa.

e, assim, 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 Conclusões

É possível listar várias aplicações para os métodos de simulação e otimização, como definir a localização de inventários, otimizar o sistema *kanban*, gerar *layouts*. Muitas destas ideias podem ser viabilizadas apenas com ferramentas matemáticas tradicionais; todavia, em cenários

complexos, essas ferramentas carecem de aderência com os realísticos. A complexidade do cenário torna os métodos analíticos caros e, muitas vezes, de aplicação difícil, pois exigem um maior processamento do computador e capacitação do profissional, enquanto a abordagem híbrida permite encontrar pontos críticos de forma mais simples e econômica por intermédio de *softwares* mais baratos, facilitando a correção de erros matemáticos no modelo.

Este artigo mostra que abordagens híbridas podem também ser utilizadas para aumentar a confiabilidade de uma proposta. Um método de otimização pura, por não apresentar as variáveis estocásticas do sistema, obteve um resultado que, caso fosse implementado, geraria um 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%, enquanto o custo total do processo aumentou 0,6%.

O caso aqui apresentado contribui para a eficiência das estratégias de terceirização, e também serve de incentivo à utilização de métodos de otimização-simulação em diferentes pontos da cadeia de suprimentos. A cada ano que passa, a importância da tecnologia na competitividade da empresa aumenta, e este estudo apresenta uma aplicação segura e eficiente de tecnologia, reduzindo a necessidade de conhecimento empírico no processo de decisão.

Uma sugestão para projetos futuros é melhorar os modelos de otimização e simulação de forma que mais condições fossem analisadas para aprimorar a confiabilidade dos resultados, tais como:

- Aplicação de técnicas de previsão de demanda para incluir estocasticidade e sazonalidade.

- Análise de um sistema com mais de um fornecedor, em que cada um oferece um preço distinto.
- Estudo mais aprofundado dos custos logísticos do sistema, incluindo a variação no nível de estoque e a movimentação interna.

Referências

- BYRNE, M. D.; BAKIR, M. A. Production planning using a hybrid simulation: Analytical approach. *International Journal of Production Economics*, v. 59, p. 305-311, 1999.
- CAPUTO, A. C.; PALUMBO, M. Manufacturing re-insourcing in the textile industry: a case study. *Industrial Management & Data Systems*, v. 105, n. 2, p. 193-207, 2005.
- CASAROTTO FILHO, N. Cluster e inovação: as mudanças nos distritos industriais e a quarta fase da intervenção na região da Emilia Romagna. In: AMATO NETO, J. SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO NA PEQUENA E MÉDIA EMPRESA, 3., 2015. São Paulo, *Anais ...* São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2015.
- DRAUZ, R. Re-insourcing as a manufacturing-strategic option during a crisis – cases from the automobile industry. *Journal of Business Research*, v. 67, p. 346-353, 2014.
- LAROQUE, C. et al. Increase of robustness of production plans using a hybrid optimization and simulation approach. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, v. 5, n. 3 & 4, 2012.
- QUÉLIN, B.; DUHAMEL, F. Bringing together strategic outsourcing and corporate strategy: outsourcing motives and risks. *European Management Journal*, v. 21, n. 5, p. 647-661, 2003.
- WANG E. J. et al. Analysis of outsourcing cost-effectiveness using a linear programming model with fuzzy multiple goals. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 2, p. 501-523, 2010.
- WU, D et al. Supply chain outsourcing risk using an integrated stochastic-fuzzy optimization approach. *Information Sciences*, v. 235, p. 242-258, 2013.
- ZHEN, L. A three-stage optimization model for production and outsourcing under China's export-oriented tax policies. *Transportation Research Part E*, v. 69, p. 1-20, 2014.

Dados de produção					
Item		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

Anexo A: Dados de produção

Plano de produção da semana					
	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

Anexo B: Plano de produção da semana

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

Anexo C: Capacidade disponível por processo

Recebido em 8 set. 2015 / aprovado em 26 out. 2015

Para referenciar este texto

SILVA, G. F.; FRAZZON, E. M.; CASAROTTO FILHO, N. Proposta de método de otimização-simulação para apoiar a tomada de decisão em internalização de processos produtivos. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 161-172, 2015.