

CONTROLE PELA CARGA DE TRABALHO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA

WORKLOAD CONTROL IN A FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM

Daniel Battaglia¹, Vagner Gerhardt Mancio², Letícia Diesel³, Miguel Afonso Sellitto^{2,*}

RESUMO

O objetivo deste artigo foi calcular tempos de atravessamento e inventário médios em um sistema de manufatura flexível, que atende muitas ordens, de tamanho e mix variado. Foi aplicado o workload control (controle por carga de trabalho) para o cálculo da situação atual, e simulação computacional (software ProModel) para avaliar duas situações alternativas: aumento na demanda e redução na demanda. O método de pesquisa foi a modelagem quantitativa. Os resultados apontam que atualmente há excesso de inventário, provocado por desequilíbrio entre demanda e entrega da manufatura, o que é típico em sistemas de filas. Seria necessário sincronizar melhor entradas e saídas. Os cenários simulados apontam que a manufatura não suporta aumento de carga, crescendo continuamente o inventário, até a operação tornar-se inviável. Para estabilidade do inventário, seria necessário reduzir a demanda, se for mantido o atual regime de trabalho, com entradas aleatórias e independentes.

Palavras-chave: Controle de manufatura, inventário, tempo de atravessamento, sistemas flexíveis de manufatura, simulação computacional.

ABSTRACTS

The aim of this article was to calculate average lead-times and inventory in a flexible manufacture system, which serves many orders of varied size and mix. The Workload Control was applied for the calculation of the current situation. Computer simulation, with the ProModel software, was used to evaluate alternative situations: increased demand and reduced demand. The research method was the quantitative modeling. The results show that there are excessive inventory, caused by imbalance between demand and service of the manufacture, typical in queue systems. It would be necessary to synchronize arrivals and exits. The simulated scenarios indicate that the manufacture does not support loading increase, growing continually inventory until infeasibility. For stability of the inventory, it would be necessary to reduce the demand, given that the current situation, with random and independent inputs.

Keywords: Manufacturing control, inventory, lead-time, flexible manufacturing systems, computer simulation.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Bento Gonçalves, Brazil.

² Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, Brazil.

³ Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Santa Cruz do Sul, Brazil.

* Autor para correspondência: sellitto@unisinobr

Recebido: 16.04.2015 Aceitado: 30.01.2016

INTRODUÇÃO

O ambiente competitivo moderno propicia que as organizações de manufatura atuem na fronteira estratégica de negócios, operando em mercados globais (Kumar & Motwani, 1995). Sob o enfoque da manufatura flexível, empresas contemporâneas buscam aliar a redução de custos com a melhoria da qualidade, a diversificação e personalização de produtos (Omar *et al.*, 2013), além de buscarem qualificar suas estratégias de fabricação com o uso de novas técnicas de manufatura, o emprego mais efetivo da automação, a redução dos tempos de atravessamento e maior integração e simultaneidade de fabricação (Bartezzaghi *et al.*, 1997; Omar *et al.*, 2013). Nesse sentido, apresenta-se como oportunidade compreender e aplicar ferramentas para o gerenciamento adequado de sistemas de manufatura, conhecer boas práticas operacionais e melhorar o desempenho produtivo através da redução dos tempos de atravessamento e controle mais efetivo do inventário (Glock, 2012). Ademais, verifica-se que a busca por prazos cada vez mais reduzidos é constante para alavancagem da competitividade, assim como o uso crescente de modelos para a determinação de tempos de atravessamento (Chang *et al.*, 2006).

Um Sistema Flexível de Manufatura ou FMS (*Flexible Manufacturing Systems*) é caracterizado como uma célula que contém máquinas automatizadas interligadas por sistema de transporte, manipulação e armazenagem, automatizado e controlado por sistema computacional. Além disso, são capazes de executar uma variedade de peças diferentes de forma simultânea sendo necessária apenas a troca dos programas (Groover, 2011). Assim, o FMS pode ser definido uma série de máquinas, com alta capacidade de processamento, controladas e que estão conectadas a sistemas automatizados de transporte, estações de carga e descarga e locais de armazenagem, integradas sob o controle de um computador. Estes sistemas são capazes de processar simultaneamente vários tipos de peças de modo aleatório e com diferentes volumes (Kouvelis, 1992). Os sistemas flexíveis de manufatura (FMS) são compostos por várias máquinas flexíveis e máquinas especiais interligadas por um sistema de transporte flexível. Várias peças diferentes passam no sistema de transporte através de percursos diferentes e podem ser usinadas ao mesmo tempo. A denominação de um FMS pode variar conforme o número de máquinas-ferramenta utilizadas e o nível de flexibilidade, entretanto esta distinção não é aceita totalmente. Quando o sistema é formado por três máquinas ou menos, pode ser chamado de Célula Flexível de Manufatura ou FMC e quando possui mais de quatro máquinas é chamado de FMS. Para a caracterização do sistema flexível de manufatura devem ser atendidos alguns critérios: (i) produzir peças diferentes simultaneamente; (ii) permitir a introdução de novas peças e de mudanças no sequenciamento da produção; e (iii) não parar o sistema para troca de ferramentas (Groover, 2011).

Todavia, também para FMS, controlar inventário e tempos de atravessamento pode auxiliar nas decisões de controle em chão-de-fábrica. A busca por prazos menores é uma premissa para a tomada de decisão, buscando-se o atendimento flexível da demanda em consonância com a capacidade produtiva instalada da fábrica (Wang & Zhou, 2013). Complementarmente, a medição do tempo de atravessamento e do inventário na manufatura pode contribuir para ajustar a capacidade produtiva à necessidade de customização de produtos e à necessidade de entregas mais pontuais (Pereira *et al.*, 2011; Borchardt *et al.*, 2008).

Segundo Wiendahl & Breithaupt (2001), o uso do *Workload Control* (WLC) ou *Load-Oriented Control* tem como finalidade controlar a carga de trabalho da manufatura, servindo como indicador de capacidade produtiva e ferramenta de ajuste do nível de inventário de acordo com as ordens de fabricação, buscando-se a redução dos tempos de atravessamento sem comprometer a flexibilidade da manufatura. Segundo Haskose *et al.* (2004), a discussão em torno da literatura baseada em MTO (*make-to-order manufacturing*) exige aplicação de métodos para planejamento da produção em baixas quantidades e alta customização dos produtos, o que exige abordagens estocásticas para apoio à tomada de decisão e redução das incertezas. O autor comenta que o uso de métodos mais robustos para controlar centros de trabalhos pode melhorar a produtividade da manufatura, além de sugerir que estudos

realizados demonstram que mecanismos de controle orientados pelas ordens de fabricação podem contribuir para o sucesso da manufatura frente à maior diversificação de produtos.

Inventário é caracterizado como o acúmulo de materiais ao longo do processo de manufatura. Inventários podem ser caracterizados como materiais ainda não usados, mas cujas matérias-primas já foram requisitadas pela manufatura. Adicionalmente, podem ser caracterizados como os materiais pertencentes às ordens de fabricação que já iniciaram e ainda não foram concluídas, seja porque ainda estão em processamento, seja porque esperam na fila sua vez de serem processados, seja porque já foram processados parcialmente e esperam partes faltantes (Moura *et al.*, 2007). O inventário em processo (*work in process* ou WIP) também é chamado de estoque em processo e consiste em materiais que já foram liberados para a manufatura, mas as respectivas ordens ainda não foram concluídas (Facchin & Sellitto, 2008). Tempo de atravessamento é aquele tempo que o sistema produtivo usa para transformar matérias primas em produtos acabados, ou seja, entre a liberação de uma ordem para a produção até que o momento em que produto se torne disponível para o cliente. O tempo de atravessamento vale tanto para serviços como para produtos (Sellitto *et al.*, 2006) e pode ser amplo ou estrito. O tempo de atravessamento amplo mede o tempo decorrido entre a solicitação do cliente e a entrega do produto ou serviço, enquanto o estrito mede as operações individuais internas da manufatura. Tempo de atravessamento, ou tempo de produção designa o tempo decorrido entre a liberação da ordem para a manufatura e a disponibilidade do produto para embarque ao cliente (Antunes *et al.*, 2007).

Sendo assim, os tempos de atravessamento estão ligados a tempos de espera e de processamento em filas na manufatura e inventários estão ligados aos tamanhos destas filas. Medição de inventário em processo e tempos de atravessamento pode ser útil em tomadas de decisão em manufatura e podem ser feitas por simulação computacional (Facchin & Sellitto, 2008). Wiendahl & Breithaupt (2000) e Wiendahl *et al.*, (1992) sugerem a aplicação do WLC. O modelo de cálculo necessita das ordens de fabricação e o tempo de atravessamento nos centros de trabalho, definido como TL_i , é representado pela equação 1.

$$TL_i = T_{PEi} - T_{PEUi} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

TL_i = tempo de atravessamento da ordem i no centro de trabalho atual;

T_{PEi} = representa o instante de tempo de fim do processamento da ordem i no centro de trabalho anterior; e

T_{PEUi} = representa o instante de tempo de fim do processamento da ordem i no centro de trabalho atual.

Para calcular o tempo médio de atravessamento das ordens (TL_m) em um centro de trabalho, utiliza-se a equação 2.

$$TL_m = \sum_{i=1}^n \left[\frac{T_{PEi} - T_{PEUi}}{n} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

n representa o número de ordens no centro de trabalho.

Da mesma forma pode-se utilizar um indicador mais representativo que considera o tempo de espera da ordem e também o quanto ela necessita de processamento no centro de trabalho (TL_{mw}), dada pela equação 3,

$$TL_{mw} = \frac{\sum_{i=1}^n TL_i \times TO_i}{\sum_{i=1}^n TO_i} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

TL_i representa o tempo de atravessamento simples da ordem i ; e

TO_i representa o tempo-padrão da ordem i .

Para medir inventário, Wiendahl & Breithaupt (2000) definem a taxa com a qual as unidades de produtos são entregues segundo a unidade de medida padrão da ordem (ex.: metros por hora, toneladas por hora) e permite estabelecer o inventário médio (Moura *et al.*, 2007), dado pela equação 4,

$$I_m = \left[\frac{\Delta UV}{T_n - T_1} \right] \times TL_{mw} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

I_m é o inventário médio;

ΔUV é o total de unidades de valor despachadas pelas ordens de fabricação analisadas; e t_n e t_1 são os instantes de tempo em que as ordens n e 1 foram encerradas.

A equação 5 representa o pulmão da manufatura (B_m).

$$B_m = P_m \times \Delta T_{m\acute{a}x} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: P_m é o resultado médio da manufatura; e

$\Delta T_{m\acute{a}x}$ é o intervalo máximo observado sem chegada de ordens ao centro de trabalho.

Por fim, desvios-padrão em medições de tempos de atravessamento ($TL_{\sigma w}$) são dados pela equação 6 (Sellitto *et al.*, 2008).

$$TL_{\sigma w} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TL_{mw} - TL_i)^2 \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}} \quad (\text{Equação 6})$$

Adicionalmente, observa-se que Wiendahl (1995) usa o diagrama de entradas e saídas para representar a relação das quantidades de produtos que entram no centro de trabalho segundo as ordens de fabricação, pela quantidades de produtos que são entregues aos clientes (taxa de saída). O WLC é um conceito de Planejamento e Controle da Produção, especialmente para o tipo de processo (*job shop*) onde é produzido um elevado número de artigos diferentes, normalmente em pequenas quantidades e de acordo com determinadas especificações do cliente, como em FMS (Haskose *et al.*, 2002). Tem como principal objetivo controlar as filas de espera do espaço fabril, com vista a respeitar as datas de entrega prometidas com base nos recursos disponíveis. Se as filas de espera permanecerem pequenas e controladas, então os tempos de espera e os tempos de percurso irão manter-se controlados. Assim, o WLC dá suporte ao controle de estoque, capacidade e tempo de atravessamento por meio da integração de produção e de vendas em um sistema hierárquico de cargas de trabalho (Hendry & Kingsman, 1989; Kingsman *et al.*, 1993). Para se proceder ao controle da carga de trabalho é necessário o controle do *input* (quantidade de trabalho que entra no *job shop*) e o *output* (quantidade de ordens que saem). O principal objetivo do WLC é o controle das filas de espera do espaço fabril, com o intuito de criar tempos de percurso estáveis e reduzidos e com isto atender às datas de entrega contratadas (Fernandes *et al.*, 2014; Land *et al.*, 2014).

A figura 1 ilustra o diagrama de entradas e saídas.

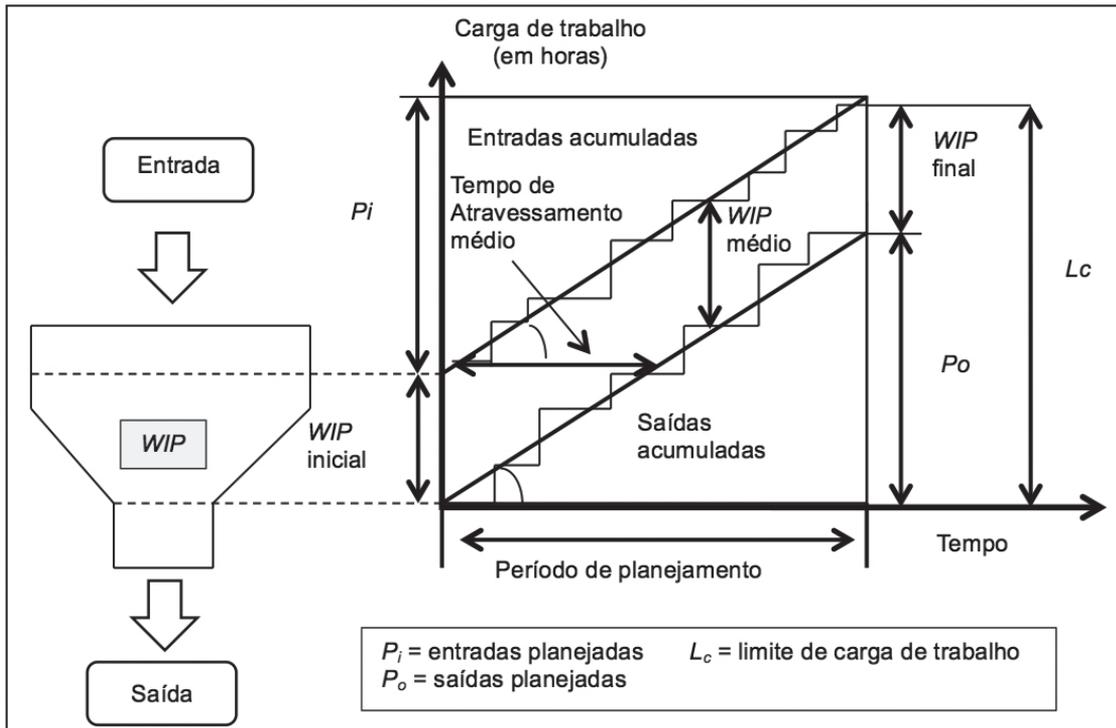


Figura 1. Diagrama de entradas e saídas
Fonte: Adaptado de Wiendahl (1995)

O WLC analisa o tempo de atravessamento das ordens comparando-se as datas de entrada e saída dos pedidos e o inventário em processo. Também verifica a carga de trabalho da manufatura informando se existe desequilíbrio entre a quantidade de pedidos que entram e que saem. Lacunas teóricas apontam a oportunidade em se investigar apropriadamente a influência do tempo de atravessamento sobre as ordens de fabricação em sistemas flexíveis de manufatura. Conforme sugerido por Bertrand & Van Ooijen (2000) o tempo de atravessamento das ordens tem forte impacto no tempo de atravessamento da manufatura. Também indicado por Haskose *et al.* (2004) e Hendry *et al.* (1998), os resultados obtidos com o método WLC são influenciados pela complexidade do sistema, o que enseja maior número de estudos empíricos para auxiliar no processo de tomada de decisão para o gerenciamento e controle de sistemas produtivos, além de servirem como diretrizes para melhorar o desempenho de sistemas de manufatura (Hendry *et al.*, 2008). Tomando-se como base tais oportunidades, este trabalho tem como objetivo aplicar o WLC para analisar o tempo de atravessamento e o inventário em processo em um sistema flexível de manufatura, fabricante de artefatos plásticos. O método de pesquisa foi a modelagem quantitativa. Para as análises, utilizaram-se como base dados referentes a 150 ordens de fabricação que passaram pelo FMS.

METODOLOGIA

Nesta pesquisa, utilizou-se como base teórica o WLC (Wiendahl *et al.*, 1992, Wiendahl & Breithaupt, 2001; Bechte, 1988). Os procedimentos de pesquisa foram:

- (i) coleta de dados em uma empresa da indústria metal-mecânica que implantou FMS, o que resultou em uma lista de ordens de fabricação e respectivos dados;
- (ii) análise dos dados com base no software Minitab® v.16 (histograma), StatFit (distribuição de probabilidade dos tempos de atravessamento) e MSEXcel 2010 (diagrama

de entradas e saídas), o que resultou no cálculo do parâmetros da manufatura e da distribuição do tempo de atravessamento; e

- (iii) a partir do cenário mais provável, construído com apoio do MSExcel 2010, análise de cenários otimista e pessimista construídos com o software ProModel de simulação computacional por relaxação de parâmetros.

Os dados para o estudo foram obtidos dos relatórios de resultados da manufatura de 150 ordens de fabricação da empresa investigada. Os relatórios apontam as quantidades de produção e as datas de entrada e de saída de ordens executadas entre janeiro e maio de 2013. Dos dados, calcularam-se os tempos de atravessamento simples e ponderados. Os resultados da manufatura não permitem generalizações, entretanto representam uma janela de tempo com um número significativo de ordens de fabricação, fornecendo um histórico apreciável de informações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 apresenta as ordens entregues entre janeiro e julho de 2013. Observe-se a variedade no tamanho das ordens.

Tabela 1. Dados das ordens

Ordem de Produção	Qtde	Data Entrada	Data Saída	TL_s	TL_{wq}
18000	15	02/01/2013	04/01/2013	2	30
17998	2080	02/01/2013	17/01/2013	15	31200
18016	39	09/01/2013	15/01/2013	6	234
18012	20	08/01/2013	17/01/2013	9	180
18018	42	10/01/2013	17/01/2013	7	294
18017	50	10/01/2013	17/01/2013	7	350
17997	68	02/01/2013	03/01/2013	1	68
18011	38	07/01/2013	08/01/2013	1	38
18010	130	07/01/2013	18/01/2013	11	1430
18003	25	04/01/2013	04/01/2013	0	0
18004	20	04/01/2013	04/01/2013	0	0
18002	70	03/01/2013	21/01/2013	18	1260
18001	85	03/01/2013	22/01/2013	19	1615
18021	40	11/01/2013	21/01/2013	10	400
18025	50	16/01/2013	21/01/2013	5	250
18029	20	22/01/2013	23/01/2013	1	20
18035	25	24/01/2013	25/01/2013	1	25
18039	20	25/01/2013	28/01/2013	3	60
18045	19	30/01/2013	31/01/2013	1	19
17997	27	02/01/2013	31/01/2013	29	783
18020	210	11/01/2013	31/01/2013	20	4200

18023	68	14/01/2013	05/02/2013	22	1496
18040	140	28/01/2013	13/02/2013	16	2240
18026	37	16/01/2013	08/02/2013	23	851
18052	40	05/02/2013	13/02/2013	8	320
18056	40	05/02/2013	14/02/2013	9	360
18063	18	07/02/2013	14/02/2013	7	126
18046	50	01/02/2013	08/02/2013	7	350
18047	40	04/02/2013	04/02/2013	0	0
18048	62	04/02/2013	06/02/2013	2	124
18050	18	04/02/2013	04/02/2013	0	0
18064	10	07/02/2013	14/02/2013	7	70
18079	51	13/02/2013	15/02/2013	2	102
18028	185	21/01/2013	14/02/2013	24	4440
18053	400	05/02/2013	06/02/2013	1	400
18059	25	06/02/2013	18/02/2013	12	300
18055	30	05/02/2013	06/02/2013	1	30
18061	60	07/02/2013	19/02/2013	12	720
18024	45	15/01/2013	18/02/2013	34	1530
18054	56	05/02/2013	05/02/2013	0	0
18051	30	04/02/2013	20/02/2013	16	480
18081	60	18/02/2013	18/02/2013	0	0
18080	40	18/02/2013	18/02/2013	0	0
18068	100	07/02/2013	19/02/2013	12	1200
18058	72	06/02/2013	20/02/2013	14	1008
18060	30	06/02/2013	22/02/2013	16	480
18037	68	25/01/2013	22/02/2013	28	1904
18049	28	04/02/2013	22/02/2013	18	504
18057	24	05/02/2013	22/02/2013	17	408
18065	105	07/02/2013	25/02/2013	18	1890
18067	25	08/02/2013	25/02/2013	17	425
18062	60	07/02/2013	25/02/2013	18	1080
18084	5	18/02/2013	25/02/2013	7	35
18054	144	05/02/2013	25/02/2013	20	2880
18075	40	13/02/2013	26/02/2013	13	520
18083	140	18/02/2013	26/02/2013	8	1120
18073	19	08/02/2013	26/02/2013	18	342
18082	18	18/02/2013	26/02/2013	8	144
18085	25	19/02/2013	26/02/2013	7	175
18074	24	13/02/2013	27/02/2013	14	336
18087	18	21/02/2013	27/02/2013	6	108

18093	50	25/02/2013	27/02/2013	2	100
18095	10	27/02/2013	27/02/2013	0	0
18089	25	21/02/2013	01/03/2013	8	200
18091	50	22/02/2013	04/03/2013	10	500
18096	17	28/02/2013	06/03/2013	6	102
18097	17	28/02/2013	06/03/2013	6	102
18101	22	04/03/2013	06/03/2013	2	44
18105	10	06/03/2013	06/03/2013	0	0
18110	36	07/03/2013	07/03/2013	0	0
18111	40	07/03/2013	08/03/2013	1	40
18106	50	06/03/2013	11/03/2013	5	250
18076	40	13/02/2013	25/02/2013	12	480
18113	20	07/03/2013	11/03/2013	4	80
18114	25	11/03/2013	13/03/2013	2	50
18116	50	11/03/2013	13/03/2013	2	100
18132	150	15/03/2013	19/03/2013	4	600
18100	2080	01/03/2013	19/03/2013	18	37440
18109	50	06/03/2013	20/03/2013	14	700
18066	80	07/02/2013	21/03/2013	42	3360
18077	40	13/02/2013	21/03/2013	36	1440
18115	20	11/03/2013	21/03/2013	10	200
18092	400	22/02/2013	05/03/2013	11	4400
18118	20	11/03/2013	22/03/2013	11	220
18126	15	13/03/2013	28/03/2013	15	225
18090	55	21/02/2013	21/03/2013	28	1540
18102	24	04/03/2013	22/03/2013	18	432
18099	21	01/03/2013	22/03/2013	21	441
18137	30	18/03/2013	26/03/2013	8	240
18088	100	21/02/2013	22/03/2013	29	2900
18125	26	13/03/2013	27/03/2013	14	364
18138	20	18/03/2013	01/04/2013	14	280
18142	30	20/03/2013	27/03/2013	7	210
18123	33	12/03/2013	26/03/2013	14	462
18086	200	20/02/2013	25/03/2013	33	6600
18104	65	05/03/2013	28/03/2013	23	1495
18135	14	15/03/2013	27/03/2013	12	168
18136	15	18/03/2013	27/03/2013	9	135
18119	30	12/03/2013	27/03/2013	15	450
18122	24	12/03/2013	27/03/2013	15	360
18130	30	14/03/2013	27/03/2013	13	390

18133	50	15/03/2013	27/03/2013	12	600
18092	260	22/02/2013	14/03/2013	20	5200
18112	30	07/03/2013	28/03/2013	21	630
18120	30	12/03/2013	28/03/2013	16	480
18117	44	11/03/2013	28/03/2013	17	748
18092	440	22/02/2013	03/04/2013	40	17600
18121	220	12/03/2013	04/04/2013	23	5060
18156	21	28/03/2013	03/04/2013	6	126
18139	54	18/03/2013	03/04/2013	16	864
18124	500	13/03/2013	08/04/2013	26	13000
18170	130	05/04/2013	08/04/2013	3	390
18151	70	25/03/2013	11/04/2013	17	1190
18143	310	20/03/2013	10/04/2013	21	6510
18162	30	02/04/2013	08/04/2013	6	180
18163	20	03/04/2013	08/04/2013	5	100
18092	200	22/02/2013	21/03/2013	27	5400
18171	19	04/04/2013	15/04/2013	11	209
18146	41	21/03/2013	11/04/2013	21	861
18149	27	22/03/2013	11/04/2013	20	540
18150	25	25/03/2013	11/04/2013	17	425
18172	10	08/04/2013	16/04/2013	8	80
18092	400	22/02/2013	26/03/2013	32	12800
18173	17	08/04/2013	16/04/2013	8	136
18158	600	01/04/2013	16/04/2013	15	9000
18161	35	02/04/2013	11/04/2013	9	315
18152	150	26/03/2013	17/04/2013	22	3300
18174	40	09/04/2013	12/04/2013	3	120
18176	20	09/04/2013	12/04/2013	3	60
18124	500	13/03/2013	03/04/2013	21	10500
18189	20	17/04/2013	17/04/2013	0	0
18134	170	15/03/2013	18/04/2013	34	5780
18177	6	10/04/2013	15/04/2013	5	30
18145	6	21/03/2013	12/04/2013	22	132
18154	31	26/03/2013	16/04/2013	21	651
18191	600	17/04/2013	25/04/2013	8	4800
18157	12	28/03/2013	17/04/2013	20	240
18153	1300	26/03/2013	26/04/2013	31	40300
18175	141	09/04/2013	29/04/2013	20	2820
18204	30	26/04/2013	29/04/2013	3	90
18205	50	29/04/2013	30/04/2013	1	50

18180	100	11/04/2013	03/05/2013	22	2200
18181	27	11/04/2013	03/05/2013	22	594
18187	70	17/04/2013	03/05/2013	16	1120
18188	10	17/04/2013	02/05/2013	15	150
18184	33	15/04/2013	09/05/2013	24	792
18186	27	16/04/2013	09/05/2013	23	621
18190	20	17/04/2013	19/04/2013	2	40
18213	40	08/05/2013	09/05/2013	1	40
18195	2	18/04/2013	06/05/2013	18	36

A tabela traz o número da ordem, a quantidade de produtos, a data de liberação para manufatura, a data de entrega, os tempos de atravessamento simples (TL) e ponderados por quantidade (TL_{wqtde}). Os tempos de atravessamento foram calculados; os demais dados foram informados pela empresa

O tempo de atravessamento é dado em dias, considerando a data de entrada da ordem na manufatura e a data de entrega (TL_m – equação 2), com média $\mu = 12,64$ dias e desvio padrão $\sigma = 9,55$ dias. Continuando, a coluna TL_{wqtde} representa a quantidade de itens da ordem multiplicada pelo TL simples da ordem. O total de entregas realizadas foi de 16565 produtos em 126 dias (de 04/01/2013 a 09/01/2013) e que representa uma taxa de entregas de 131,47 produtos/dia ou uma entrega a cada 10,95 minutos. Aplicando-se a equação 4, obtém-se um inventário médio $I_m = 2340,98$ produtos. O maior intervalo sem entradas foi de nove dias (de 29/04/13 a 08/05/13) que resulta em um pulmão $B_m = 1183,21$ produtos (equação 5).

O WLC fornece tempo de atravessamento médio da manufatura e o controle de inventário ao longo do centro de trabalho. Para verificar a distribuição do TL , utilizou-se o software StatFit para a identificação da distribuição de probabilidade com melhor ajuste para os dados, sem *outliers* (TL s de 40 e 42 dias), totalizando 148 ordens. Apesar dos dados serem discretos, pois não há fração de dias, a distribuição que apresentou melhor ajuste para os dados segundo o StatFit, considerando-os como contínuos foi a distribuição exponencial, com média $\mu = 12,62$ e parâmetro de localização = 0,93. A figura 2 ilustra o histograma dos TL sem os *outliers*.

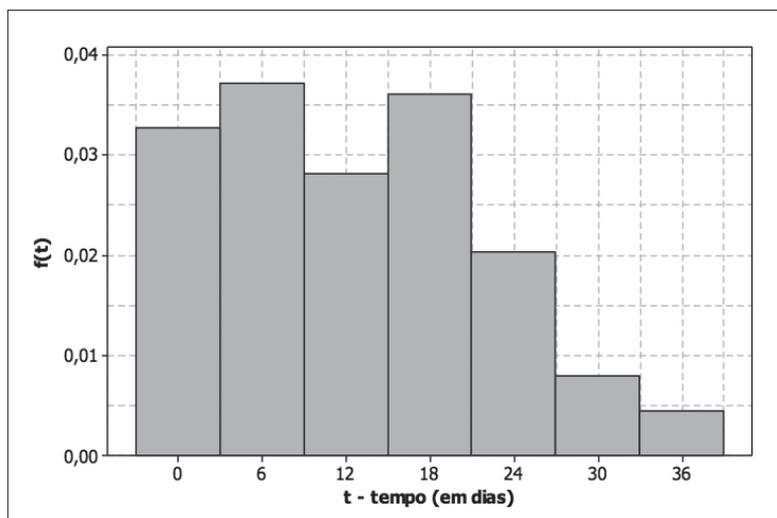


Figura 2. Histograma dos TL (sem *outliers*)

A tabela 2 apresenta a síntese geral dos resultados obtidos com o WLC. É possível identificar que o inventário médio (I_m) está bem acima do pulmão (B_m), o que indica desequilíbrio nos fluxos de entrada e saída: há inventário em excesso.

Tabela 2. Indicadores de resultados da manufatura

Indicadores	Resultados
TL_m	12,64 dias
σTL_m	9,55 dias
TL_{wqtde}	17,81 dias
σTL_{wqtde}	9,53 dias
P_m	131,47 produtos/dia
Taxa de Serviço	0,0076 dias/produto
Inventário médio I_m	2340,98 produtos
Pulmão B_m	1183,23 produtos

A tabela 3 organiza os dados em períodos quinzenais e apoia o diagrama de entradas e saídas da manufatura, apresentado na figura 3.

Tabela 3. Inventários quinzenais do período analisado

Tempo decorrido	Entrada	Saída	Inventário
0	0	0	0
15	3072	205	2867
30	3686	3093	593
45	5397	4338	1059
60	10028	5668	4360
75	12326	6665	5661
90	14468	10571	3897
105	15726	13105	2621
120	16555	16256	299
135	16565	16565	0

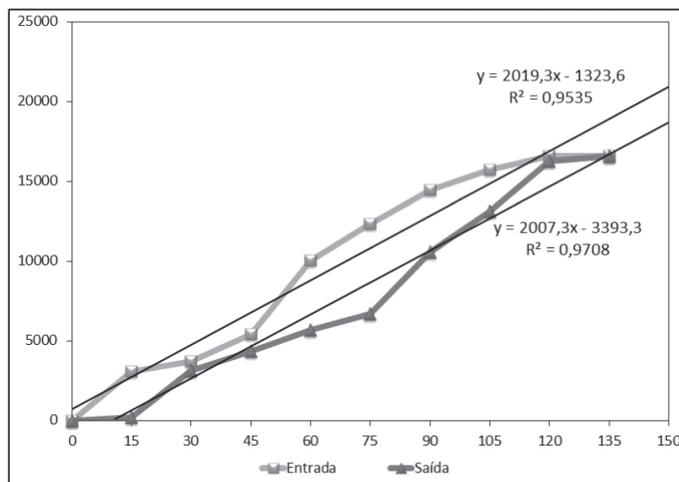


Figura 3. Diagrama de entradas e saídas da manufatura

Para verificar possíveis impactos de modificações nos parâmetros de manufatura, usou-se simulação computacional. Foram testados com apoio do software ProModel: (i) cenário 1 (C1), otimista com ordens diárias não maiores que o P_m , e (ii) cenário 2 (C2), pessimista com ordens não menores que o P_m .

A figura 4 apresenta os resultados da simulação, apresentando os diagramas diagrama de entradas e saídas construídos e indicando os inventários em processo para os cenários simulados. A simulação aponta que, caso só se admitam ordens não maiores que o P_m diário, é possível operar com inventário médio reduzido, o que reduz os tempos de atravessamento do FMS.

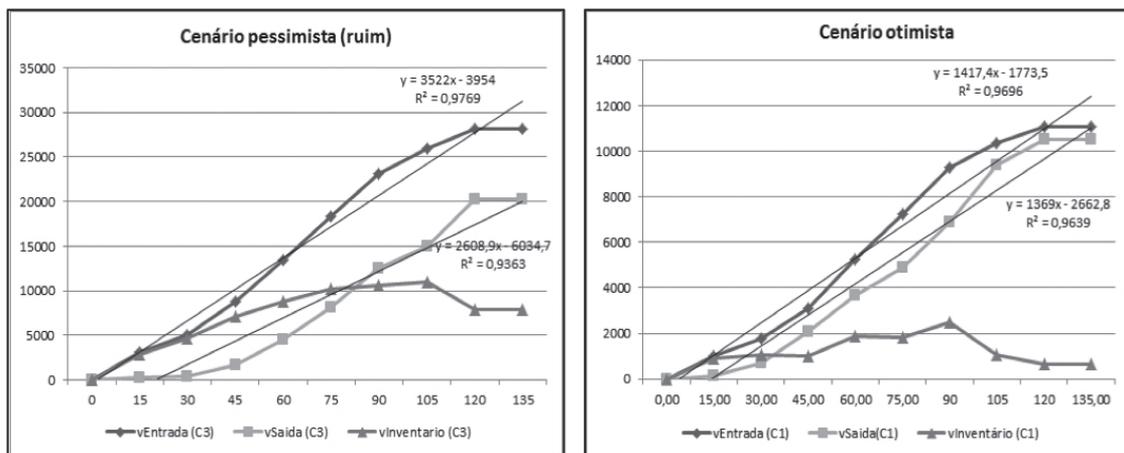


Figura 4. Cenários simulados com o uso do software ProModel.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do WLC para obtenção de indicadores de resultados na fabricação permitiu verificar a quantidade de ordens que saem e entram no sistema, bem como o tempo de atravessamento médio, permitindo um controle mais efetivo sobre o inventário dos centros de trabalho. Foram demonstrados indicadores importantes na gestão de produção, tais como estoque em processo e o tempo de atravessamento e lançadas as bases para o uso mais eficaz da abordagem WLC no caso investigado. De forma analítica e gráfica, foram obtidos o inventário, o tempo da atravessamento, a autonomia de manufatura, e a necessidade de pulmão.

O método pode suportar decisões de manufatura, principalmente ligadas ao tamanho do inventário, que não pode ser tão pequeno a ponto de gerar interrupções, nem tão grande a ponto de aumentar o tempo de atravessamento. O diagrama de resultados do estudo indica uma possível incompatibilidade da manufatura para atender a demanda do mercado. O diagrama também mostra que é necessário um melhor acompanhamento e controle por parte dos gestores da empresa para permitir falhas de atendimento aos clientes.

Os resultados indicam que a manufatura precisa superar alguns desequilíbrios nos processos de fabricação, de modo a suprir corretamente a demanda do mercado e melhorar o desempenho da empresa. Com o estudo, foi verificado que o estoque médio está bem acima do pulmão proposto. Além disso, as análises realizadas sugerem que o inventário pode ser reduzido para ajustar melhor as quantidades de pedidos ao longo do período de análise.

Os resultados obtidos não permitem generalizações, mas podem contribuir para o processo

de tomada de decisões, ajudando a estabelecer uma estratégia para reduzir inventário e controlar melhor os prazos de entrega.

RECOMENDAÇÕES

Como oportunidade para estudos adicionais, sugere-se a aplicação de modelagem e simulação computacional em outros cenários de fabricação, diferentes da manufatura seriada, para verificar se a capacidade do método de medição se mantém. Também se recomendam novas aplicações em diversas situações de demanda, tais como em sistemas sazonais e em sistemas com demanda crescente e decrescente, o que deve acarretar necessidade de pulmões dinâmicos. Por fim, recomenda-se aplicar o método em instalações de serviços, tais como instalações bancárias, comerciais, aeroportuárias e hospitalares. Para tanto, o conceito de inventário deve ser adaptado, passando a incorporar pessoas a espera de serviço, e não ordens de fabricação.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à CAPES (prof. Battaglia) e ao CNPq (prof. Sellitto) pelo apoio financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, J., ALVAREZ, R., KLIPPEL, M., BORTOLOTO, P., and PELLEGRIN, I. *Sistemas de Produção*. Porto Alegre: Bookman, 2007.

BARTEZZAGHI, E., SPINA, G., and VERGANTI, R. Strategically flexible production and the extra-firm infrastructures: How regions become attractive. *Integrated Manufacturing Systems*, 1997, vol. 8, no. 5-6, p. 333–346.

BECHTE, W. Theory and practice of load-oriented manufacturing control. *International Journal of Production Research*, 1988, vol. 26, no. 3, p. 375–395.

BERTRAND, J.W.M., and VAN OOIJEN, H.P.G. Customer order lead times for production based on lead time and tardiness costs. *International Journal of Production Economics*, 2000, vol. 64, no. 1, p. 257–265.

BORCHARDT, M., SELLITTO, M., and PEREIRA, G. Serviços de pós-venda para produtos fabricados em base tecnológica. *Produção Online*, 2008, vol. 8, no. 2, p. 1-26.

CHANG, H.C., OUYANG, L.Y., WU, K.S., and HO, C.H. Integrated vendor-buyer cooperative inventory models with controllable lead time and ordering cost reduction. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 170, no. 2, p. 481–495.

FACCHIN, T., and SELLITTO, M.A. Medição do inventário em processo e tempo de atravessamento em manufatura por modelagem em redes de Petri e diagrama de resultados. *Gestão & Produção*, 2008, vol. 15, no. 2, p. 307–321.

FERNANDES, N.O., LAND, M.J., and CARMO-SILVA, S. Workload control in unbalanced job shops. *International Journal of Production Research*, 2014, vol. 52, no.3, p. 679-690.

GLOCK, C. Lead time reduction strategies in a single-vendor–single-buyer integrated inventory model with lot size-dependent lead times and stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, 2012, vol.136, no. 1, p. 37-44.

GROOVER, M. *Automação Industrial e Sistemas de Manufatura*. São Paulo: Pearson, 2011

HASKOSE, A., KINGSMAN, B., and WORTHINGTON, D. Modelling flow and jobbing shops as a queueing network for workload control. *International Journal of Production Economics*, 2002, vol. 78, no. 3, p. 271–285.

HASKOSE, A., KINGSMAN, B., and WORTHINGTON, D. Performance analysis of make-to-order manufacturing systems under different workload control regimes. *International Journal of Production Economics*, 2004, vol. 90, no. 2, p. 169–186.

HENDRY, L., LAND, M., STEVENSON, M., and GAALMAN, G. Investigating implementation issues for workload control (WLC): A comparative case study analysis. *International Journal of Production Economics*, 2008, vol. 112, no. 1, p. 452–469.

HENDRY, L., and KINGSMAN, B. Production planning systems and their applicability to make-to-order companies. *European Journal of Operational Research*, 1989, vol. 40, no. 1, p. 1–15.

HENDRY, L., KINGSMAN, B., and CHEUNG, P. The effect of workload control (WLC) on performance in make-to-order companies. *Journal of Operations Management*, 1998, vol. 16, no. 1, p. 63–75.

KINGSMAN, B., WORDEN, L., HENDRY, L., MERCER, A., and WILSON, E. Integrating marketing and production planning in make-to-order companies. *International Journal of Production Economics*, 1993, vol. 30-31, no. C, p. 53–66.

KOUVELIS, P. Design and planning problems in flexible manufacturing systems: a critical review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1992, vol. 3, no. 2, p. 75-99.

KUMAR, A., and MOTWANI, J. A methodology for assessing time-based competitive advantage of manufacturing firms, *International Journal of Operations and Production Management*, 1995, vol. 15, no. 2, p. 36–53.

LAND, M., STEVENSON, M., and THÜRER, M. Integrating load-based order release and priority dispatching. *International Journal of Production Research*, 2014, vol. 52, no. 4, p. 1059-1073.

MOURA, G., MARTINS, J., LUCKOW, F., and SELLITTO, M. Medição de tempo de atravessamento e inventário em manufatura de equipamentos eletromecânicos. 2007, *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, vol. 2, no. 4, p. 107-120.

OMAR, M., SARKER, R., and OTHMAN, W. A just-in-time three-level integrated manufacturing system for linearly time-varying demand process. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, vol. 37, no. 3, p. 1275-1281.

PEREIRA, G., SELLITTO, M., BORCHARDT, M., and GEIGER, A. Procurement cost reduction for customized non-critical items in an automotive supply chain: An action research project. *Industrial Marketing Management*, 2011, vol. 40, no. 1, p. 28-35.

SELLITTO, M.; BORCHARDT, M.; and PEREIRA, G. Avaliação multicriterial de desempenho: um estudo de caso na indústria de transporte coletivo de passageiros. *Gestão & Produção*, 2006, vol. 13, no. 2, p. 339-352.

SELLITTO, M., BORCHARDT, M., and PEREIRA, G. Medição de tempo de atravessamento e inventário em processo em manufatura controlada por ordens de fabricação. *Produção*, 2008, vol. 18, no. 3, p. 493-507.

WANG, J., and ZHOU, G. Study on response time decision of supply chain based on instant customerization. *Journal of Applied Sciences*, 2013, vol. 13, no. 22, p. 5422–5427.

WIENDAHL, H.P., and BREITHAUPT, J.W. Automatic production control applying control theory. *International Journal of Production Economics*, 2000, vol. 63, no. 1, p. 33–46.

WIENDAHL, H.P., and BREITHAUPT, J.W. Backlog-oriented automatic production control. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2001, vol. 50, no. 1, p. 331–334.

WIENDAHL, H.P. *Load-oriented manufacturing control*. Berlin: Springer, 1995.

WIENDAHL, H.P., GLÄSSNER, J., and PETERMANN, D. Application of load-oriented manufacturing control in industry. *Production Planning & Control*, 1992, vol. 3, no. 2, p. 118–129.

