

298



Universidade Técnica de Lisboa
INSTITUTO SUPERIOR DE ECONOMIA E GESTÃO



CADERNOS DE ECONÓMICAS

DOCUMENTO DE TRABALHO Nº 2/98

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM
SISTEMA DE PRODUÇÃO POR ENCOMENDA**

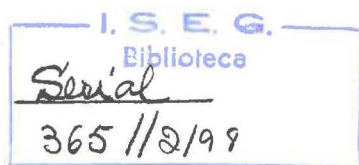
ALBERTO FERREIRA PEREIRA

DEPARTAMENTO DE GESTÃO

R. Miguel Lúpi, 20 - 1200 Lisboa - Fax: 01.3922808 - Telf. 01.3922811/86

Avaliação do Desempenho de um Sistema de Produção por Encomenda

Alberto Ferreira Pereira [♦]



Resumo

Este estudo avalia o desempenho de uma central de produção de betão pronto como um exemplo típico de produção por encomenda. O desempenho é medido pelo “número médio de encomendas executadas” e pelo “tempo médio da encomenda no sistema”. O comportamento deste é analisado através de um modelo de simulação digital. São testadas catorze hipóteses de investigação. A análise da variância revela que o número médio de encomenda executadas varia com o nível dos três factores experimentais utilizados, recursos de transportes, regra de sequenciamento e capacidade de colocação do produto mas não existe efeito de interacção entre os três factores; o “tempo médio da encomenda no sistema” varia com os recursos de transporte e a capacidade de colocação mas não com a regra de sequenciamento. Porém, o “tempo médio da encomenda no sistema” varia com o efeito combinado dos três factores. A regra FIFO tende a proporcionar melhor desempenho que a outra regra de sequenciamento testada que confere prioridade à encomenda de maior dimensão.

Palavras-chave: organização da produção, produção por encomenda, sequenciamento, desempenho de sistema de produção, simulação.

[♦] Professor Associado, Departamento de Gestão do Instituto Superior de Economia e Gestão.
Correspondência para Edifício Bento de Jesus Caraça, Rua Miguel Lúpi, 20 - 1200 Lisboa, Portugal.



Introdução

Existem diversas situações em que numa empresa industrial a produção só pode ter lugar quando existe uma encomenda feita por um cliente. Nos casos em que tal sucede diz-se que a empresa funciona em regime de produção por encomenda. A produção por encomenda é frequentemente necessária quando existem várias configurações de produtos possíveis e, conseqüentemente, uma probabilidade reduzida de prever as necessidades de um cliente [Vollman, Berry e Whybark, 1984]. Alguns esforços têm sido desenvolvidos no sentido de adaptar os instrumentos tradicionais de planeamento da produção para inventário à produção por encomenda, nomeadamente a aplicação dos elementos básicos de um sistema MRP num contexto de produção por encomenda de baixo volume [Fumero e Vercellis, 1994]. Entre estes dois sistemas de produção existem algumas diferenças notáveis. Destacam-se algumas: (i) as técnicas geralmente utilizadas na produção para inventário como o alisamento da cadência de produção e/ou a manutenção de stocks de segurança de produtos acabados não podem ser utilizadas na produção por encomenda; (ii) na produção por encomenda geralmente são menores as quantidades produzidas pelo que não é premente a necessidade de utilização de políticas para a determinação de lotes económicos com vista à redução dos custos operacionais; (iii) é mais difícil elaborar previsões de procura em produção por encomenda devido à grande variedade de produtos que podem ser fabricados [Fumero e Vercellis, 1994].

A produção de betão pronto é um caso particular de produção por encomenda. Na indústria de betão pronto existem 60 configurações de produtos diferentes, o produto não é armazenável, o tempo de transporte entre o local de produção e o de utilização final deve ser mínimo e a entrega ao cliente corresponde, geralmente, à utilização final.

Neste estudo procedemos à avaliação do desempenho de uma central de produção de betão do tipo radial operando sob diversas configurações definidas pela combinação de diferentes níveis de recursos de transportes utilizados, duas regras de sequenciamento e três níveis de capacidade de colocação do betão. O desempenho do sistema é avaliado pelo “número médio de encomendas executadas” e pelo “tempo médio da encomenda no sistema”. Os parâmetros utilizados no modelo desenvolvido

neste estudo correspondem aos de uma central de betão que opera no Sul de Portugal cuja identidade é protegida a pedido do seu proprietário e que por isso, aqui, se designa por empresa ABC.

Revisão da Literatura



Algumas características do problema da produção por encomenda em particular os aspectos que se prendem com o planeamento da capacidade e com o sequenciamento da produção contribuem para lhe acrescentar complexidade.

Uma das principais funções do planeamento da capacidade é a de estimar as cargas para cada estação de trabalho para cada um dos períodos futuros, assistir a gestão no ajustamento de recursos, obter informação antecipada sobre estrangulamentos e estimar datas credíveis de conclusão de encomendas recebidas dos clientes. A dificuldade em alcançar estes objectivos num ambiente dinâmico e interactivo é evidente se se tiver em conta que o tempo despendido por uma encomenda no sistema de produção é função não apenas das características da encomenda e das regras utilizadas para estabelecer prioridades e lançamento de encomendas, como também depende do tipo e do estatuto das encomendas que já se encontram no sistema [Adam e Surkis, 1977].

Muitas situações de excesso de trabalho em determinados departamentos e de dificuldades no cumprimento de prazos de entrega são imputáveis a problemas de sequenciamento ou de controlo [Holstein, 1968]. Porém, a verdadeira causa pode residir num desajustamento entre a capacidade de produção e a procura estimada ou em previsões de vendas pouco realistas.

Para Vollman, Berry e Whybark [1984], o objectivo de gestão com o planeamento da capacidade de produção é o de procurar assegurar a capacidade necessária para satisfazer os planos de produção da empresa. Sem a provisão de capacidade adequada ou a constatação da existência de excesso de capacidade não é possível retirar os benefícios de um sistema de planeamento e controlo da produção. Capacidade insuficiente conduzirá rapidamente à deterioração dos tempos de entrega, a um aumento das existências de produtos em vias de fabrico e à frustração do pessoal da produção que procurará solucionar os problemas recorrendo ao sistema informal.

Por outro lado a existência de excesso de capacidade constitui um encargo desnecessário que pode ser reduzido. Vollmann, Berry e Whybark [1984] sugerem um processo de planeamento da capacidade de produção com cinco níveis bem como o seu relacionamento com o processo e controlo. O processo sugerido começa com um plano geral de recursos, prossegue com uma avaliação aproximada das implicações de capacidade de um determinado plano director de produção, depois avalia detalhadamente os requisitos de capacidade com base nos registos detalhados do planeamento dos requisitos de materiais (MRP), continua com procedimentos de carregamento finito e termina com técnicas de input/output para ajudar a acompanhar a execução dos planos

Numa era como a actual caracterizada por intensa concorrência, as empresas preocupam-se, por um lado em minimizar toda e qualquer fonte de desperdício [Savsar e Al-Jawini, 1995] e, por outro, em responder rapidamente às novas solicitações dos clientes, melhorar permanentemente a qualidade dos produtos e a capacidade de entrega [Fortuin, 1988]. Deste contexto em que as empresas desenvolvem a sua actividade emergem dois objectivos, aparentemente inconciliáveis, que constituem uma dificuldade para o processo de planeamento da capacidade de produção: (i) minimizar fontes de desperdício significa minimizar a sub-utilização da capacidade de produção, o que pode gerar pressões para a redução desta e, (ii) uma maior capacidade de resposta às solicitações dos clientes significa ter capacidade de produção suficiente para lhes dar resposta nos prazos e condições estabelecidas, podendo daqui resultar a necessidade de aumentar a capacidade de produção.

A importância que o problema da utilização eficiente da capacidade de produção instalada suscita, está amplamente reflectida na literatura. Bowers e Agarwal [1995] descrevem um caso real em que a necessidade de introdução de um sistema de sequenciamento e planeamento da produção de curto prazo teve lugar após a verificação e um elevado nível de existências de produtos em vias de fabrico. Este sistema permitiu à empresa reduzir o nível de existências de produtos em via de fabrico em 200 mil dólares, aumentar o número de entregas atempadas de 74 para 90%, libertar o responsável pelo planeamento da produção de inúmeras horas não produtivas dedicadas a procurar soluções de sequenciamento por tentativas e aproximações, além de outros benefícios indirectos. Flanders e Davis [1995] reportam

o caso de uma empresa que operava um sistema de produção flexível em situação de sub-utilização tal como no-lo revelou a análise de alguns indicadores estatísticos de desempenho. Decidiu-se pela adopção de um sequenciamento da produção mais eficiente que assegurava a produção diária dos componentes necessários e permitia disponibilizar a capacidade excedentária para a produção de outros componentes. Foi identificado o estrangulamento sem que no entanto pudesse ter sido indicada uma solução. Sinha et al. [1995], descrevem a situação de uma siderurgia que pretendeu otimizar as suas operações num contexto de escassez de recursos e desequilíbrios de capacidade. Constituíram um grupo de trabalho que tinha como tarefa maximizar a contribuição das diversas unidades da empresa para o lucro global através da optimização da utilização do principal recurso escasso, a energia eléctrica. Desenvolveu-se um modelo para definir que unidades da empresa deveriam funcionar para uma dada disponibilidade de energia eléctrica e de forma a que a sua utilização fosse a mais lucrativa para a empresa. Os benefícios resultantes da aplicação do modelo foram calculados comparando a contribuição por mega watt-hora antes e depois da aplicação do modelo. No primeiro ano da aplicação do modelo, os lucros por mega watt-hora aumentaram 73 milhões de dólares. Obtiveram-se ainda outros benefícios indirectos

O sequenciamento da produção tem como objectivo ordenar as operações a serem executadas em cada máquina tendo em atenção as restrições de rotas e da fábrica, com vista a otimizar uma determinada medida de desempenho. A complexidade do problema de sequenciamento da produção por encomenda decorre da necessidade de equilibrar vários objectivos, alguns deles incompatíveis como, por exemplo, datas de conclusão, restrições de custos, nível de produção, capacidade da máquina, rotas alternativas, características da encomenda e características e disponibilidades de recursos. Trata-se de um problema investigado desde a década de 50 sendo vasta a literatura específica sobre o tópico nomeadamente a que se refere ao caso específico de limitação de recursos. Tem sido abordado como se de um projecto com recursos limitados se tratasse.

Este problema onde a disponibilidade dos recursos é limitada designa-se por “problema de sequenciamento de projecto com recursos limitados (SPRL)” [Lee e Kim, 1996]. Existem muitas versões do problema SPRL que se distinguem entre si,

entre outros, pelo número de projectos simultâneos (simples ou múltiplos), função objectivo, características dos recursos ou ainda pelas condições de reserva antecipada de recursos. Os objectivos mais amplamente prosseguidos são os de minimização da duração do projecto, minimização do custo total, maximização do valor actual líquido dos fluxos de caixa associados ao projecto e alisamento no nível de utilização dos recursos [Lee e Kim, 1996].

A minimização da duração de um projecto em condições de restrição de recursos constitui um problema cuja discussão é comum e surge quando os recursos necessários à execução das actividades de um projecto estão disponíveis em quantidades limitadas, fixas, de tal forma que a procura por parte das actividades concorrentes não pode ser satisfeita (Davis e Patterson, 1975). Em condições desta natureza torna-se necessário tomar decisões sobre o sequenciamento de actividades, frequentemente resultando em aumento na duração do tempo necessário para a conclusão do projecto.

Ao relativo insucesso verificado na obtenção de procedimentos de optimização para projectos com recursos limitados, têm os estudiosos e investigadores respondido com um esforço considerável dirigido ao desenvolvimento de procedimentos heurísticos que produzam “boas” soluções exequíveis. A imposição de limites no montante dos recursos disponíveis para a execução de um projecto conduz ao alargamento do tempo para a sua conclusão. Trata-se, porém, de uma realidade presente na maioria dos projectos empresariais para cuja resolução se recorre à utilização de técnicas de solução heurística. Uma heurística é um conjunto de regras de decisão que podem conduzir a uma solução óptima mas não garantem optimalidade.

Numa síntese elaborada por Davis e Patterson [1975], estes procedimentos heurísticos são agrupados em duas categorias: uma primeira categoria inclui as heurísticas que de alguma forma consideram a medida do *tempo*, como, por exemplo, a duração da actividade, o tempo de início e fim da actividade, e a segunda inclui as heurísticas que de alguma forma contemplam medidas de *utilização de recursos*. Estes autores conduziram uma experiência a fim de comparar a eficácia de oito heurísticas de ambas as categorias com referência a uma solução óptima para um conjunto de 83 problemas multi-recursos diferentes. As oito heurísticas estudadas são: *minimum job*

slack (MINSLK), resource scheduling method (RSM), minimum late finish time, greatest resource demand, greatest resource utilization, shortest imminent operation, most jobs possible e select jobs randomly. Uma descrição detalhada desta heurísticas pode ser encontrada em Davis e Patterson [1975].

Badiru [1993] apresenta uma extensão do diagrama do caminho crítico designada diagrama de recursos críticos para lidar com três categorias de limitações: tempo, recursos e requisitos de desempenho. Pritsker, Watters e Wolfe [1969] revêm o problema de escalonamento de multi-projectos com limitação de recursos (mão-de-obra, equipamentos, instalações, etc.) recorrendo à programação matemática 0-1. Oguz e Bala [1994] abordam também este problema de gestão de projectos com restrição de recursos recorrendo à programação por inteiros. Davis e Heidorn [1971] abordam igualmente o problema da gestão de projecto em condições de restrições de recursos descrevendo um procedimento algorítmico para minimizar a duração de um projecto constituído por um conjunto finito de tarefas, cada uma delas de duração inteira, requerendo um montante fixo de um ou mais recursos diferentes e sujeito a um conjunto de relações de precedência que especificam as actividades permissíveis. Uma vez iniciada a execução da actividade, esta não pode ser interrompida e existem limites à disponibilidade de cada recurso. Lorterapong [1994] incorpora a incerteza na gestão de projectos recorrendo para o efeito à utilização da teoria do conjunto difusos. Desenvolve uma técnica dividida em dois grandes conjuntos, formação de grupos e avaliação de grupos, que afecta os recursos às actividades dos projectos de forma a minimizar atrasos inevitáveis, utilizar os recursos disponíveis tanto quanto for possível e reduzir a interrupção dos recursos. Nkasu [1994] apresenta uma metodologia designada Computer Sequencing Approach to Multi-Resource Constrained Scheduling, ou COMSARS. Trata-se de um procedimento heurístico iterativo segundo o qual as actividades de um projecto são aleatoriamente seleccionadas para escalonamento sujeitas aos requisitos de precedência predeterminados e à disponibilidade de recursos. No decurso do processo iterativo obtém-se sucessivas melhorias do tempo de conclusão do projecto por via de simulações Monte Carlo e da capacidade de deslocar recursos alternativos tão cedo quanto fiquem disponíveis. O escalonamento continua de forma iterativa enquanto se antevê a possibilidade de melhorar o calendário obtido, terminando quando mais

melhorias no tempo de conclusão do projecto não forem possíveis. Demeulemeester e Herroelen [1992] abordam o problema da gestão de projectos com restrição de múltiplos recursos utilizando um procedimento enumerativo (*branch and bound*). No seu trabalho indicam algumas referências bibliográficas importantes e de interesse para o estudioso mais interessado.

Metodologia

Para avaliar o desempenho da central radial ABC de produção de betão pronto operando sob dezoito configurações diferentes ($3 \times 2 \times 3$) utilizamos um desenho experimental do tipo *full factorial* [Hicks, 1982]. O desempenho do sistema é avaliado pelo “número médio de encomendas executadas” e pelo “tempo médio da encomenda no sistema”. Definimos três factores experimentais: recursos de transportes (TRAN), regra de sequenciamento (SEQU) e capacidade de colocação (COLC). O primeiro define a capacidade máxima de transporte do betão, medida em metros cúbicos, entre a central de produção e o local de colocação do betão e tem três níveis, respectivamente, 24, 30 e 36 metros cúbicos. O segundo factor define o critério utilizado para sequenciar a encomenda a executar. Consideram-se dois níveis, FIFO e EPME (Execute Primeiro Maior Encomenda). O terceiro factor define a capacidade de colocação do betão na obra, medida em metros cúbicos, para três níveis, respectivamente, 12,5, 25 e 35 metros cúbicos por hora. Definimos as seguintes 14 hipóteses de investigação:

- H₁: O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente do nível de recursos de transporte (TRAN).
- H₂: O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente do nível de recursos de transporte (TRAN).
- H₃: O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente da regra de sequenciamento (SEQU).
- H₄: O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo independentemente da regra de sequenciamento (SEQU).
- H₅: O número médio de encomendas executadas é o mesmo independentemente da capacidade de colocação (COLC).
- H₆: O tempo médio de encomendas no sistema é o mesmo independentemente da capacidade e colocação (COLC).

-
- H₇: Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento no número médio e encomendas executadas (TRAN×SEQU).
- H₈: Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento no tempo médio da encomenda no sistema (TRAN×SEQU).
- H₉: Não existe efeito de interacção entre a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (SEQU×COLC).
- H₁₀: Não existe efeito de interacção entre a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (SEQU×COLC).
- H₁₁: Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no número médio de encomendas executadas (TRAN×COLC).
- H₁₂: Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (TRAN×COLC).
- H₁₃: Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no número de encomendas executadas (TRAN×SEQU×COLC).
- H₁₄: Não existe efeito de interacção entre o nível de recursos de transporte, regra de sequenciamento e a capacidade de colocação no tempo médio da encomenda no sistema (TRAN×SEQU×COLC).

Para estudar o processo de produção recorreu-se a um modelo de simulação representativo do funcionamento da central de produção de betão. O valor da simulação reside na possibilidade de ver como é que o sistema reage quando determinadas condições são alteradas sem corromper o sistema real [Walde, 1991]. O recurso à simulação é frequente em estudos sobre o comportamento de sistemas complexos de produção [Savsar e Al-Jawini, 1995; Pereira, 1990; Chan, 1995].

O modelo de simulação foi construído em SLAM (*Simulation Language for Alternative Modeling*), uma linguagem baseada em FORTRAN [Pritsker, 1986] amplamente utilizada em estudos semelhantes, na indústria e em projectos governamentais. A verificação do modelo foi feita através da comparação dos resultados obtidos em várias replicações com dados de produção reais da empresa ABC. O modelo funcionou como esperado. Foram ainda efectuadas alterações no período de tempo utilizado para gerar entidades no sistema com recurso intencional a

valores extremos para verificar se os resultados obtidos com o modelo acompanhavam as alterações introduzidas. Particular cuidado foi igualmente exercido no sentido de verificar que os atributos das entidades criadas pelo modelo correspondiam a valores fixos pré determinados ou que outras não visitavam, intencionalmente, determinados nódulos da rede representativa do sistema de produção modelado.

Resultados

Os resultados obtidos reportam-se ao funcionamento do sistema em estado de estabilização. A remoção do estado de transição [Conway, 1963; Pritsker, 1986; Pereira, 1990] fez-se através de um estudo experimental onde se analisou a variável de interesse “tempo médio da encomenda no sistema”. Selecionaram-se quatro configurações e para cada uma executaram-se cinco replicações. A primeira recolha de dados sobre o comportamento da variável de interesse ocorreu ao cabo de um período razoavelmente amplo, escolhido aleatoriamente, de 96 mil minutos. As recolhas subsequentes tiveram lugar ao fim de incrementos de 10 mil minutos, perfazendo um total de 22 incrementos. Observações complementares foram feitas para valores inferiores a 96 mil minutos. A inspecção visual revelou grande instabilidade do sistema para valores compreendidos entre 46 mil e 96 mil minutos. Esta mesma inspecção revelou que o sistema aparentemente estabilizava ao fim de um período de 216 mil minutos. Os dados obtido para a variável “tempo médio da encomenda no sistema” foram utilizados para testar a seguinte hipótese nula:

H_0 : O tempo médio da encomenda no sistema é o mesmo para o período de funcionamento entre 216 mil e 316 mil minutos.

Os resultados da análise da variância do estudo experimental que se mostram na Tabela I permitem aceitar que o sistema estabiliza depois de ter operado 216 mil minutos.

Tabela I - Resultados da Análise da Variância do Estudo Experimental

	F	Prob > F	
Configuração I			
Replicação 1	11,250	0,0085	
Replicação 2	1,208	0,3002	++
Replicação 3	6,093	0,0357	+
Replicação 4	1,511	0,2502	+
Replicação 5	4,006	0,0764	++
Configuração II			
Replicação 1	5,878	0,0383	+
Replicação 2	1,481	0,2545	+
Replicação 3	6,303	0,0333	+
Replicação 4	2,548	0,1449	++
Replicação 5	6,616	0,0301	+
Configuração III			
Replicação 1	12,695	0,0061	
Replicação 2	0,012	0,9164	++
Replicação 3	3,668	0,0877	++
Replicação 4	4,294	0,0681	++
Replicação 5	23,892	0,0009	
Configuração IV			
Replicação 1	9,940	0,0117	+
Replicação 2	0,056	0,8196	++
Replicação 3	3,913	0,0793	++
Replicação 4	5,637	0,0416	+
Replicação 5	21,946	0,0011	

+ Não permite rejeitar H_0 ($\alpha = 0,01$)

++ Não permite rejeitar H_0 ($\alpha = 0,05$)

No estudo principal, recorreu-se à fórmula proposta por Pritsker [1986] para se determinar o número de replicações necessárias para se obter um intervalo de confiança de 95%. Obteve-se um valor de 7,7248 que foi arredondado para 8 replicações. No estudo principal considera-se um período de funcionamento de 22 dias úteis por mês e 8 horas por dia, o que equivale a 10560 minutos. Para eliminar a distorção provocada pelo período de estabilização, os vectores estatísticos são “limpos” no instante 216 mil minutos. Após cada período de 10560 minutos são recolhidos estatísticas relativas às variáveis “número médio de encomendas executadas” e “tempo médio da encomenda no sistema”. No conjunto das 18 configurações estudadas recolheram-se para cada uma das duas variáveis 144 observações ($3 \times 2 \times 3 \times 8$).

A Tabela II mostra os valores obtidos para a variável “número médio de encomendas executadas” (NMEE).

Tabela II - Número Médio de Encomendas Executadas (unidades)

TOTAL		82,49
TRAN		
	24 m ³	73,75
	30 m ³	85,52
	36 m ³	87,46
SEQU		
	FIFO	84,93
	EPME	79,90
COLC		
	12,5 m ³ / hora	76,80
	25 m ³ / hora	84,23
	35 m ³ / hora	85,96



A análise da variância da variável “número médio de encomendas executadas” conduziu à rejeição das hipóteses H_1 , H_3 e H_5 , isto é, o NMEE varia com o nível de recursos de transporte (TRAN), com a regra de sequenciamento (SEQU) e com a capacidade de colocação (COLC). Foram igualmente rejeitadas as hipóteses H_7 e H_{11} , o que significa que o NMEE é afectado pela combinação do nível de recursos de transporte com a regra de sequenciamento por um lado e que, por outro, o NMEE é também afectado pela combinação do nível de recursos de transporte com a capacidade de colocação. O estudo mais detalhado da interacção entre o nível de recursos de transporte (TRAN) e a regra de sequenciamento (SEQU) revela os valores constantes da Tabela III para o número médio de encomendas no sistema (NMEE):

Tabela III - Número Médio (unidades) de Encomendas Executadas (TRAN×SEQU)

Recursos de transporte	FIFO	EPME
24 m ³	79,79	66,50
30 m ³	87,25	83,79
36 m ³	87,75	87,17

O valor mais elevado do NMEE ocorre ao nível mais alto dos recursos de transporte combinado com FIFO. Com a utilização de FIFO, a passagem da capacidade de transporte de 30 m³ para 36 m³ não produz senão um acréscimo marginal. O mesmo não ocorre, porém, quando se utiliza EPME. Para uma capacidade de transporte de 36 m³ não existem diferenças substanciais entre FIFO e EPME.

A Tabela IV mostra o “número médio de encomendas executadas” quando se considera a interação entre o nível de recursos de transporte (TRAN) e a capacidade de colocação (COLC).

Tabela IV - Número Médio (unidades) de Encomendas Executadas (TRAN×COLC)

Recursos de transporte	Capacidade de Colocação		
	12,5 m ³ por hora	25,0 m ³ por hora	35,0 m ³ por hora
24 m ³	55,67	78,38	82,69
30 m ³	83,06	86,44	87,06
36 m ³	86,38	87,88	88,13

Para qualquer nível de capacidade de colocação, os valores mais elevados do NMEE ocorrem sempre ao nível mais elevado dos recursos de transporte (36 m³). São menos substanciais os acréscimos no NMEE quando se altera a capacidade dos recursos de transporte de 30 para 36 metros cúbicos do que quando se altera de 24 para 30 metros cúbicos. Qualquer que seja o nível dos recursos de transporte, os valores mais elevados do NMEE ocorrem quando a capacidade de colocação é a mais elevada, 35 m³. Observa-se igualmente que são mais significativos os aumentos no NMEE quando a capacidade de colocação se altera de 12,5 para 25 metros cúbicos do que quando a alteração se processa de 25 para 35 metros cúbicos para todos os níveis dos recursos de transporte.

A Tabela V mostra o tempo médio (em minutos) das encomendas no sistema (TMES).

Tabela V - Tempo Médio (minutos) das Encomendas no Sistema (TMES)

TOTAL		6 735,50
TRAN		
	24 m ³	18 005,34
	30 m ³	2 779,04
	36 m ³	361,27
SEQU		
	FIFO	7 671,61
	EPME	5 744,32
COLC		
	12,5 m ³ / hora	13 660,30
	25 m ³ / hora	6 023,23
	35 m ³ / hora	1 061,04

A análise da variância da variável “tempo médio da encomenda no sistema” conduziu à rejeição das hipóteses H_2 e H_6 , isto é, o TMES varia com o nível de recursos de transporte (TRAN) e com a capacidade de colocação (COLC). Foram igualmente rejeitadas as hipóteses H_{10} e H_{12} , o que significa o TMES é diferente para diferentes combinações dos factores regra de sequenciamento (SEQU) e capacidade de colocação por um lado, e por outro difere também para diferentes combinações dos factores recursos de transporte e capacidade de colocação. O TMES difere também para diferentes combinações do três factores experimentais, pelo que se rejeita igualmente a hipótese H_{14} . A não rejeição das hipóteses H_4 e H_8 leva-nos a analisar os resultados das interacções entre os factores experimentais “regra de sequenciamento” e “capacidade de colocação”; “recursos de transporte” e “capacidade de colocação”; e “recursos de transporte”, “regra de sequenciamento” e “capacidade de colocação”.

Na Tabela VI vemos o “tempo médio da encomenda no sistema” para a interacção “regra de sequenciamento \times capacidade de colocação”

Tabela VI - Tempo Médio (em minutos) da Encomenda no Sistema (SEQU \times COLC)

Regra de Sequenciamento	12,5 m ³ por hora	25 m ³ por hora	35 m ³ por hora
FIFO	18 414,63	3 859,79	740,42
EPME	7 955,10	8 264,67	1 381,67

Com excepção da combinação “FIFO \times 12,5m³/hora”, a regra de sequenciamento FIFO é a que permite obter valores mais baixos para o “tempo médio da encomenda no sistema” qualquer que seja a capacidade de colocação. Para uma capacidade de colocação de 12,5 m³/hora, a gestão deve sequenciar as suas encomendas de acordo com a dimensão da encomenda, executando primeiro as maiores.

Na Tabela VII observamos os tempos médios da encomenda no sistema sob a configuração “recursos de transporte \times capacidade de colocação”.

Tabela VII - Tempo Médio (em minutos) da Encomenda no Sistema (TRAN×COLC)

Recursos de Transporte	12,5 m ³ por hora	25 m ³ por hora	35 m ³ por hora
24 m ³	39 575,00	17 324,38	2 509,06
30 m ³	7 283,13	599,00	455,00
36 m ³	601,44	263,31	219,06

É para o nível mais elevado da capacidade de colocação que se obtêm os tempos médios da encomenda no sistema mais baixos qualquer que seja o nível dos recursos de transporte. Para qualquer nível de capacidade de colocação é substancial a melhoria conseguida na variável de interesse quando se aumenta o nível de recursos de transporte. A melhoria mais acentuada, de 96,5%, ocorre quando se aumentam os recursos de transporte de 24 para 30 metros cúbicos com uma capacidade de colocação de 25 metros cúbicos.

Finalmente, a Tabela VIII mostra o tempo médio, em minutos, da encomenda para a interacção “recurso de transporte × regra de sequenciamento × capacidade de colocação” (TRAN×SEQU×COLC).

Tabela VIII - Tempo Médio (em minutos) da Encomenda no Sistema (TRAN×SEQU×COLC)

Recursos de Transporte	Capacidade de Colocação					
	12,5 m ³ por hora		25 m ³ por hora		35 m ³ por hora	
	FIFO	EPME	FIFO	EPME	FIFO	EPME
24 m ³	50 200,00	18 325,00	10 878,75	23 770,00	1 652,38	3 365,75
30 m ³	4 570,00	9 996,25	463,63	734,38	363,75	546,25
36 m ³	473,88	729,00	237,00	289,63	205,13	233,00

O sistema de produção tem melhores desempenhos com o nível mais elevado de recursos de transporte qualquer que seja a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação. À excepção da interacção “30 m³×EPME×35m³/hora”, o valor mais baixo da variável TMES é obtido com a mais elevada capacidade de colocação, qualquer que seja o nível de recursos de transporte e a regra de sequenciamento. Com apenas uma excepção (“24 m³×FIFO×12,5m³/hora”), para uma dada capacidade de colocação ou um nível de recursos de transporte, a regra sequenciamento FIFO proporciona um melhor desempenho que EPME.

Conclusões

Este trabalho avaliou o desempenho de uma central de produção de betão pronto como um exemplo típico de produção por encomenda. O modelo utilizado para replicar o seu comportamento utilizou parâmetros reais de uma central que opera no Sul de Portugal. Os factores utilizados no desenho experimental, capacidade de transporte, regra de sequenciamento e capacidade de colocação, correspondem àqueles considerados relevantes nesta indústria.

O número médio de encomendas executadas varia com o nível de recursos de transporte, com a regra de sequenciamento e com a capacidade de colocação. Para um nível elevado de capacidade de transporte o número médio de encomendas executadas é igual tanto com a regra FIFO como com a regra EPME. Qualquer que seja o nível dos recursos de transporte, o maior número médio de encomendas concluídas ocorre quando a capacidade de colocação é a mais elevada. É mais significativo o aumento do número médio encomendas executadas quando a capacidade de colocação se altera de 12,5 para 25 metros cúbicos do que quando se altera de 25 para 35 metros cúbicos para os três níveis dos recursos de transporte.

Com apenas uma excepção, a regra de sequenciamento FIFO é a que permite obter tempos médios da encomenda no sistema mais baixos qualquer que seja a capacidade de colocação. Para uma capacidade de colocação baixa, a gestão deve sequenciar as suas encomendas de acordo com a dimensão da encomenda, executando em primeiro lugar as encomendas maiores.

Obtém-se melhores tempos médios de encomenda no sistema com níveis elevados de recursos de transporte qualquer que seja a regra de sequenciamento e a capacidade de colocação. Salvo um caso, em todos os demais a regra de sequenciamento FIFO gerou tempos médios de encomenda no sistema mais baixos que EPME para uma dada capacidade de colocação ou um nível de recursos de transporte.

Bibliografia



- Adam, N. e Surkis, J., "A Comparison of Capacity Planning Techniques in a Job Shop Control System", *Management Science*, 23, 9, May 1977, 1011-1015.
- Badiru, A. B., "Activity-Resource Assignments Using Critical Resource Diagramming", *Project Management Journal*, Volume XXIV, N° 3, September, 1993, 15-21.
- Bowers, M. R. e Agarwal, A., "Lower In-Process Inventories and Better On-Time Performance at Tanner Companies, Inc.", *Interfaces*, 25, 4, July-August 1995, 30-43.
- Chan, F. T. S., "Using Simulation to Predict System Performance: A Case Study of an Electro-Phoretic Deposition Plant", *Integrated Manufacturing Systems*, 6, 5, 1995, 27-38.
- Conway, R. W. "Some Tactical problems in Digital Simulation", *Management Science*, 10, 1, October 1963, 47-61.
- Davis, E. W., e Heidorn, G. E., "An Algorithm for Optimal Project Scheduling Under Multiple Resource Constraints", *Management Science*, vol. 17, no. 12, August, 1971, B803-B816.
- Davis, E. W., Patterson, J. H., "A Comparison of Heuristic and Optimum Solutions in Resource-Constrained Project Scheduling", *Management Science*, 21, 8, April 1975, 944-955.
- Demeulemeester, E. e Herroelen, W., "A Branch-and-Bound Procedure for the Multiple Resource-Constrained Project Scheduling Problem", *Management Science*, vol. 38, no. 12, December, 1992, 1803-1818.
- Flanders, S. W. e Davis, W. J., "Scheduling a Flexible Manufacturing System with Tooling Constraints: An Actual Case Study", *Interfaces*, 25, 2, March-April 1995, 42-54.
- Fortuin, L. "Performance Indicators - Why, Where and How?", *European Journal of Operational Research*, 34, 1988, 1-9.
- Fumero, F. e Vercellis, C., "Capacity Analysis in Repetitive Assemble-to-Order Manufacturing Systems", *European Journal of Operational Research*, 78, 2, October 27, 1994, 204-215.
- Hicks, C. R., *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, Third Edition, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1982.
- Holstein, W. K., "Production Planning and Control Integrated", *Harvard Business Review*, 46, 3, May-June, 1968, 121-140.
- Lee, J-K. e Kim, Y-D., "Search Heuristics for Resource Constrained Project Scheduling", *Journal of the Operational Research Society*, vol. 47, no. 5, 1996, 678-689.

-
- Lorterapong, P. , "A Fuzzy Heuristic Method for Resource-Constrained project Scheduling", *Project Management Journal*, vol. XXV, no. 4, December, 1994, 12-18.
- Nkasu, M. M., "COMSARS: a computer-sequencing approach to multiresource-constrained scheduling", *International Journal of Project Management*, vol. 12, no. 3, 1994, 183-192.
- Pereira, A. F., *The Effect of Assignment and Sequencing Rules on the Performance of a Flexible Manufacturing System*, PhD Dissertation, Clemson University, Clemson, 1990.
- Pritsker, A. A. B., *Introduction to Simulation and SLAM II*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- Pritsker, A. A., Watters, L. J. e Wolfe, P. M., "Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach", *Management Science*, vol. 16, no. 1, September, 1969, 93-108.
- Savsar, M. e Al-Jawini, A., "A Simulation Analysis of Just-in-Time Production Systems", *International Journal of Production Economics*, 42, 1, November 1995, 67-78.
- Sinha, G. P., Chandrasekaran, B. S., Mitter, N., Dutta, G., Singh, S. B., Choudhury, A. R. e Roy, P. N., "Strategic and Operational Management with Optimization at Tata Steel", *Interfaces*, 25, 1, January-February 1995, 6-19.
- Vollman, T. E., Berry, W. L. e Whybark, D. C., *Manufacturing Planning and Control Systems*, Dow Jones - Irwin, Homewood, Illinois, 1984.
- Walde, E. V. D., "Computer Simulation in Manufacturing", *Production and Inventory Management Journal*, Second Quarter, 1991, 80-83.