

Avaliação de regras de sequenciamento da produção em ambientes *Job shop* e *Flow shop* por meio de simulação computacional

Evaluation of production sequencing rules in Job shop and Flow shop environments through computer simulation

Edna Barbosa da Silva

Aluna do Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE. São Paulo, SP – Brasil. bsa.edna@gmail.com

Michele Gonçalves Costa

Aluna do Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE. São Paulo, SP – Brasil. miklina@gmail.com

Marilda Fátima de Souza da Silva

Mestre em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE. São Paulo, SP – Brasil. marilda.silva@uninove.br

Fabio Henrique Pereira

Professor Pesquisador do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE. São Paulo, SP – Brasil. fabiohp@uninove.br

Resumo

Neste trabalho, a simulação computacional é empregada para estudar os efeitos das regras de sequenciamento de produção no desempenho de ambientes de manufatura *job shop* e *flow shop*. Oito regras de sequenciamento foram consideradas, a saber: SIPT (menor tempo de processamento iminente), EDD (menor data de entrega), DLS (menor folga dinâmica), LWQ (menos trabalho na fila seguinte), FIFO (primeiro a chegar é o primeiro a ser servido), LIFO (último a chegar é o primeiro a ser servido), CR (razão crítica) e LS (menor folga). Essas regras foram avaliadas em relação ao *makespan*, ao atraso total e ao número de ordens atrasadas, considerando um cenário experimental que inclui duas configurações, com oito máquinas e dez diferentes tipos de ordens. Um modelo de simulação foi desenvolvido no programa Arena, contemplando a aleatoriedade da chegada de ordens e dos tempos de produção em tais ambientes. Os resultados mostram que as regras EDD e SIPT apresentaram os melhores desempenhos nos ambientes *job shop* e *flow shop*, respectivamente.

Palavras-chave: *Flow shop*. *Job shop*. Manufatura. Regras de sequenciamento da produção. Simulação computacional.

Abstract

In this work, the computational simulation is employed to study the effects of production sequencing rules in the performance of Job shop and Flow shop manufacturing environments. Eight sequencing rules were considered: SIPT (Shortest Imminent Processing Time), EDD (Earliest Due Date), DLS (Dynamic Least Slack), LWQ (Least Work in next Queue), FIFO (First In First Out), LIFO (Last In Last Out), CR (Critical Ratio) and LS (Least Slack). These different sequencing rules were evaluated in relation to the *makespan*, total tardiness and number of tardy jobs, considering an experimental scenario which includes two configurations with eight machines (processes) and ten different types of orders. A simulation model was developed with Arena software, incorporating randomness of order arrivals and the production times in such environments. The results show that the EDD and SIPT rules presented the best performances in the *Job shop* and in the *Flow shop* environments, respectively.

Key words: Computer simulation. Flow shop. Job shop. Manufacturing. Production scheduling rules.

1 Introdução

Devido às dificuldades encontradas pelas empresas de manufatura para melhorar os seus sistemas produtivos, diante de prioridades muitas vezes conflitantes, a simulação tornou-se uma ferramenta amplamente utilizada para gestão de produção. Uma das principais vantagens da técnica é poder lidar com problemas maiores e em razoável tempo computacional, integrando as diversas restrições do sistema, as quais podem ser incorporadas ao modelo de simulação.

De acordo com Watanabe, Ida e Gen (2005) dentre os principais e mais difíceis problemas enfrentados pelas empresas de manufatura flexível, está o sequenciamento da produção (*scheduling*), também chamado de agendamento, que significa identificar qual ou quais são os melhores modos de ordenar o programa de produção nas máquinas de tal forma que possam satisfazer vários objetivos simultaneamente. Nesse contexto, o problema de sequenciamento da produção de ambientes *job shop* (*job shop scheduling*) tem sido exaustivamente estudado. (AKASAWA, 2007; MOREIRA, 2007; XU; ZHOU, 2009).

O modelo clássico de *job shop* tratado na literatura apresenta as seguintes características: um conjunto de “n” ordens {O1, O2, O3... On} que deve ser processado em “m” máquinas {M1, M2, M3... Mm}, de acordo com “p” processos {P1, P2, P3... Pp} e algumas restrições, tais como que exista uma sequência de processo, que cada máquina processe uma ordem por vez, a qual deve ser processada do começo ao fim, além disso, os tempos de processamento podem ser fixos ou variados e os prazos de entregas podem ser diferentes. (BAPTISTE, FLAMINI; SOURD, 2008).

Na tentativa de solucionar esse problema, diversos trabalhos têm explorado a questão do sequenciamento da produção, avaliando desde regras simples de sequenciamento

(MONTEVECHI, et al., 2002; SIMS, 1997) até sistemas dinâmicos de seleção de regras em tempo real (MOUELHI-CHIBANI; PIERREVAL, 2010; VINOD; SRIDHARAN, 2008, em diferentes ambientes de produção. Destaca-se aqui o trabalho desenvolvido por Santoro e Mesquita (2008) que aborda o problema de sequenciamento de produção em ambiente *job shop*, nos quais as ordens seguem uma rota específica e pré-determinada. Um modelo de simulação, criado no *Visual Basic for Applications* (VBA) em planilhas Excel, foi utilizado para avaliar o efeito do estoque de materiais em processo em relação ao atraso total e o número total de ordens atrasadas, permitindo concluir que é possível diminuir esses atrasos e ainda manter estoques intermediários com um volume constante. O cenário de produção utilizado por aqueles autores, composto de dois ambientes de produção distintos, serviu de base para este trabalho. Entretanto, ao invés de considerar que todas as ordens estão disponíveis para entrada em produção no sistema no instante Zero (0), este trabalho contempla a aleatoriedade dos intervalos de tempos entre as chegadas das ordens, o que reflete a intenção de simular um ambiente de manufatura flexível com um elevado *mix* de produtos e com lotes tendendo à unidade.

De fato, a simulação tem sido uma das ferramentas mais utilizadas na área manufatureira, uma vez que ela proporciona meios para identificar, analisar e melhorar os parâmetros de produção e de processo, tais como: análise de quantidade de maquinário e operadores; tempos de processo; avaliação de desempenho e de procedimentos operacionais, bem como avaliar o sequenciamento de produção e fluxo produtivos, proporcionando um conhecimento dos pontos em que o sistema possibilita uma maior flexibilidade de produção (COSTA; JUNGLES, 2006; PONTES; YAMADA; PORTO, 2007).

Conforme ressaltado por Chwif e Medina (2006), o uso da simulação computacional permite prever, com certa confiança e respeitando um conjunto de premissas, o comportamento de um sistema com base em dados de entradas específicos.

Neste trabalho, a simulação computacional é empregada para estudar os efeitos das regras de sequenciamento da produção no desempenho de um ambiente de manufatura *job shop* no qual o processo permite que as ordens de produção se movam de um posto de trabalho para qualquer outro posto, de acordo com a sequência de produção pré-determinada, e um ambiente *Flow shop* em que o processo possibilita que as ordens de produção se movam apenas para um posto de trabalho a frente.

São abordadas oito regras de sequenciamento, avaliadas em relação ao tempo médio de atravessamento das ordens no sistema (*makespan*), tempo total de atraso e número médio de ordens atrasadas, considerando um cenário experimental o qual compreende duas configurações de ambiente de trabalho, com oito máquinas (processos) e dez diferentes tipos de ordens. Um modelo do sistema foi desenvolvido no *software* de simulação Arena®, contemplando o comportamento aleatório das chegadas de ordens e dos tempos de produção nesse tipo de ambiente. Os resultados obtidos mostram que as regras EDD e SIPT apresentam o melhor desempenho em ambientes *Job shop* e *Flow shop*, respectivamente.

2 Regras de sequenciamento da produção

Entende-se por regras de sequenciamento de produção, que também podem ser chamadas de agendamento da produção e de regras de expedição, o ato de lançamento de ordens, peças ou tarefas no sistema.

As principais regras de expedição adaptadas de Mesquita et al. (2008), Tubino (2007), Suresh e Sridharan (2007), Chan e Chan, (2004) e Gaither e Frazier (2002), podem ser definidas como sendo:

- FIFO – (*First In, First Out*), a prioridade é dada de acordo com a sequência em que as tarefas chegam ao sistema. Portanto, as tarefas que entram primeiro no sistema devem ser as primeiras a sair. Essa regra procura minimizar o tempo de permanência nas máquinas ou na fábrica.
- LIFO – (*Last In, First Out*), a prioridade é dada à última peça que entra, devendo ser a primeira a sair. Por ser adversa e negativa no que tange à confiabilidade e rapidez de entrega e não ter uma sequência baseada em qualidade, flexibilidade ou custo, essa regra é pouco utilizada.
- SPT – (*Shortest Processing Time*), a prioridade é dada pelo menor tempo de processamento total. É classificada em ordem crescente de tempo. Sua utilização visa reduzir o tamanho das filas e o aumento do fluxo.
- LPT – (*Longest Processing Time*), a prioridade é dada pelo maior tempo de processamento total. Contrário à regra SPT. Sua utilização visa à redução de troca de máquinas.
- EDD – (*Earliest Due Date*), a prioridade é dada pela execução das ordens mais urgentes em termos de prazo de entrega. A finalidade é reduzir atrasos.
- LS – (*Least Slack*), a prioridade é dada pela menor folga entre a data de entrega e o tempo total de processamento entre as tarefas que estão à espera. É classificada por prazo de entrega e visa reduzir atrasos.
- SIPT – (*Shortest Imminent Processing Time*), a prioridade é dada pelo menor tempo de processamento individual. Semelhante a SPT.

- LIPT – (*Longest Imminent Processing Time*), a prioridade é dada pelo maior tempo de processamento individual. Semelhante a LPT.
- LWQ – (*Least Work Next Queue*), a prioridade é dada para a tarefa com destino à máquina ou estação de trabalho com menor fila no momento. Essa regra objetiva evitar a parada de um processo subsequente.
- CR – (*Critical Ratio*), a prioridade é dada a menor razão crítica (tempo até a data de vencimento dividido pelo tempo total de produção restante) entre as tarefas à espera. Essa é uma regra dinâmica que procura combinar a EDD com a SPT, que considera apenas o tempo de processamento.
- DLS – (*Dynamic Least Slack*), a prioridade é dada a menor folga (diferença entre a data prometida de entrega e o tempo total restante de processamento). Essa regra prioriza as tarefas mais urgentes, visando reduzir atrasos, todavia é um pouco mais complicada de aplicar que a LS por se tratar de uma regra dinâmica.

3 Indicadores de desempenho

Com a finalidade de medir a eficácia de uma decisão, utilizam-se indicadores de desempenho. Cada objetivo traçado pela empresa está atrelado a uma medida de desempenho que, por sua vez, está vinculada a um ou mais indicadores de desempenho. Os indicadores mais comuns são:

- Tempo médio de fluxo ou de atravessamento (*makespan*): média entre os tempos de fluxos das ordens.
- Atraso médio ou atraso máximo: média dos atrasos ou maior atraso entre as ordens consideradas.

- Tempo total de trabalho: intervalo de tempo entre a liberação da primeira operação, da primeira ordem e a conclusão do último processo da última ordem.
- Média do estoque em processo: média da quantidade de ordens abertas e ainda não finalizadas.
- Número de ordens atrasadas: quantidade de ordens que deixaram de ser entregues ao cliente no prazo estipulado.
- Tempo total de atraso: é o somatório de todos os tempos de todas as ordens que ficaram atrasadas.

4 Modelagem e simulação

A simulação computacional refere-se aos métodos para estudar diversos modelos reais ou artificiais em sistemas de avaliação numérica utilizando-se de *softwares* projetados para imitar um sistema de operações e/ou características normalmente por um período de tempo. De forma prática, significa que é um processo de criação de um modelo computadorizado tendo por objetivo a realização de experimentos numéricos de tal forma que proporcione uma compreensão desse sistema submetido a um determinado conjunto de condições (KELTON; SADOWSKI; SADOWSKI, 2000).

Capaz de trabalhar com uma variedade maior de modelos científicos do que uma análise matemática, a simulação computacional é utilizada em casos nos quais os modelos ou problemas são muitos complexos para uma análise matemática formal (BERTRAND; FRANSOO, 2002). Não pode ser considerada como um modelo matemático, embora utilize fórmulas matemáticas na busca por soluções dos diversos sistemas. Não deve ser confundida com uma técnica de otimização, pois é uma ferramenta de análise de cenários, porém,

ela pode ser combinada com algoritmos de otimização para identificar melhores soluções.

Os *softwares* de simulação funcionam basicamente apoiados em interfaces gráficas, nas quais o usuário pode utilizá-los de forma intuitiva por meio de menus, gráficos e caixas de diálogos. A possibilidade de construir modelos executados com animações pode facilitar o entendimento do sistema, pois tais modelos permitem a inclusão de movimentos que revelam a dinâmica desse sistema.

Ao lado dos *softwares* de simulação estão às linguagens de simulação que formam um conjunto de um ou mais programas destinados a aplicações mais particulares. Sua principal vantagem é proporcionar abertura para a geração dos mais diversos tipos de sistema, porém exige que seus usuários tenham um profundo conhecimento desse tipo de linguagem para poderem criar sistemas mais complexos.

5 Materiais e métodos

O modelo para a simulação foi construído com base nos cenários de produção configurados por Santoro e Mesquita (2008), e composto de oito máquinas e dez tipos de ordens com rotas pré-estabelecidas e tempos totais de produção definidas, conforme Tabela 1. Optou-se por simular o tipo de produção de um ambiente *job shop* e um ambiente *flow shop*. As condições iniciais para o modelo de simulação proposto foram:

- a) Cada máquina está sempre disponível, ou seja, não foram incluídas indisponibilidades temporárias causadas por quebras, manutenções ou *set ups*, ou por qualquer outro motivo.
- b) Uma vez iniciado o processo de produção de uma ordem em uma máquina ele não poderá ser interrompido.

- c) Finalizada a execução de uma tarefa em uma máquina, ela é enviada automaticamente para a próxima sem considerar eventual tempo de transporte.
- d) Não há sobreposição de operações.
- e) As ordens são executadas independentemente umas das outras.
- f) Apenas com a finalidade de manter-se uma proporcionalidade, definiu-se também que a probabilidade de chegada de cada um dos dez tipos de ordem é de 10%.

Utilizou-se, também, os mesmos parâmetros para a geração da data de entrega, dada pela distribuição Normal com média $(1+k) \cdot t_0$ e desvio-padrão $0,1 \cdot (1+k) \cdot t_0$, em que t_0 é o tempo total de produção; e k , um fator de segurança em relação a esse tempo. Para essa situação, foi utilizado um valor fixo de 30% para o fator de segurança. Como exemplo de fórmula carregada no Arena®, temos: Normal $(1,30 \cdot 16,9; 0,1 \cdot 1,30 \cdot 16,9)$, na qual 16,9 é o tempo total da primeira ordem, conforme Tabela 1. O cenário-base utilizado considerava que todas as ordens estavam disponíveis para entrada em produção no sistema no instante Zero (0), porém no modelo para este trabalho, os intervalos de tempos entre as chegadas das ordens foram aleatórios e descritos por uma distribuição exponencial com média de 11 minutos. A escolha reflete a intenção de simular um ambiente de manufatura flexível com um elevado *mix* de produtos e com lotes tendendo à unidade.

A Figura 1 mostra o modelo de simulação desenvolvido, em que podem ser identificados os módulos Processo Maq i , $i = 1, \dots, 8$, os quais representam cada uma das oito máquinas do ambiente estudado, seguidas pelo módulo que informa a rota de cada ordem após passagem pela máquina. A primeira rota está identificada no módulo Estacao Lanc de Tarefas.

Tabela 1: Dados da rota e tempo estimado

Rotas em <i>job shop</i>			Rotas em <i>flow shop</i>		
#	Rota	Tempo	#	Rota	Tempo
1	1,2,3,6	16,9	1	1,3,5,6	15,5
2	1,3,7,8	16,4	2	2,3,4,5,6,8	25,6
3	1,5,8	11,6	3	1,3,4,7,8	20,3
4	1,2,3,5,6,7,8	27,3	4	3,4,5,7,8	20,9
5	3,4,6,7	16,3	5	1,2,3,5,6,7,8	26,5
6	1,2,4,3,1,2,4,5,7	36,0	6	1,2,3,5,7	19,8
7	2,6,5,6,8	20,7	7	1,2,3,4,5,7	24,5
8	1,2,4,5,7	19,7	8	1,3,5,6,8	19,8
9	2,3,4,6,7	21,0	9	2,4,6,7,8	19,1
10	1,2,4,5,8	20,6	10	3,4,5,6,7	20,1

Fonte: Santoro e Mesquita, 2008, p. 81.

Após a Estacao Saída do Sistema, estão os módulos relacionados ao desempenho de cada uma das regras de sequenciamento das ordens de produção, bem como os que documentam e armazenam esses resultados.

As informações da chegada de ordens de produção no sistema são inseridas no módulo *Create*, identificado na Figura 1 como Chegada de Tarefas. Nesse módulo, está determinado qual o comportamento de chegadas das ordens, estão determinadas quantas ordens chegam por vez, qual sua quantidade máxima prevista e qual a unidade básica de tempo utilizada.

As rotas de cada uma das ordens foram inseridas no módulo *Route* e completadas com suas respectivas seqüências no módulo *Sequence*, conforme mostra a Figura 2:

As equações utilizadas para o cálculo do tempo de processamento e para o prazo de entrega de cada ordem podem ser vistas na Figura 3.

As definições dos atributos das ordens de produção, como o tipo da ordem e seu tempo de processamento, são inseridos no modelo por meio do módulo *Assign* (módulo Tipos de Tarefas no mode-

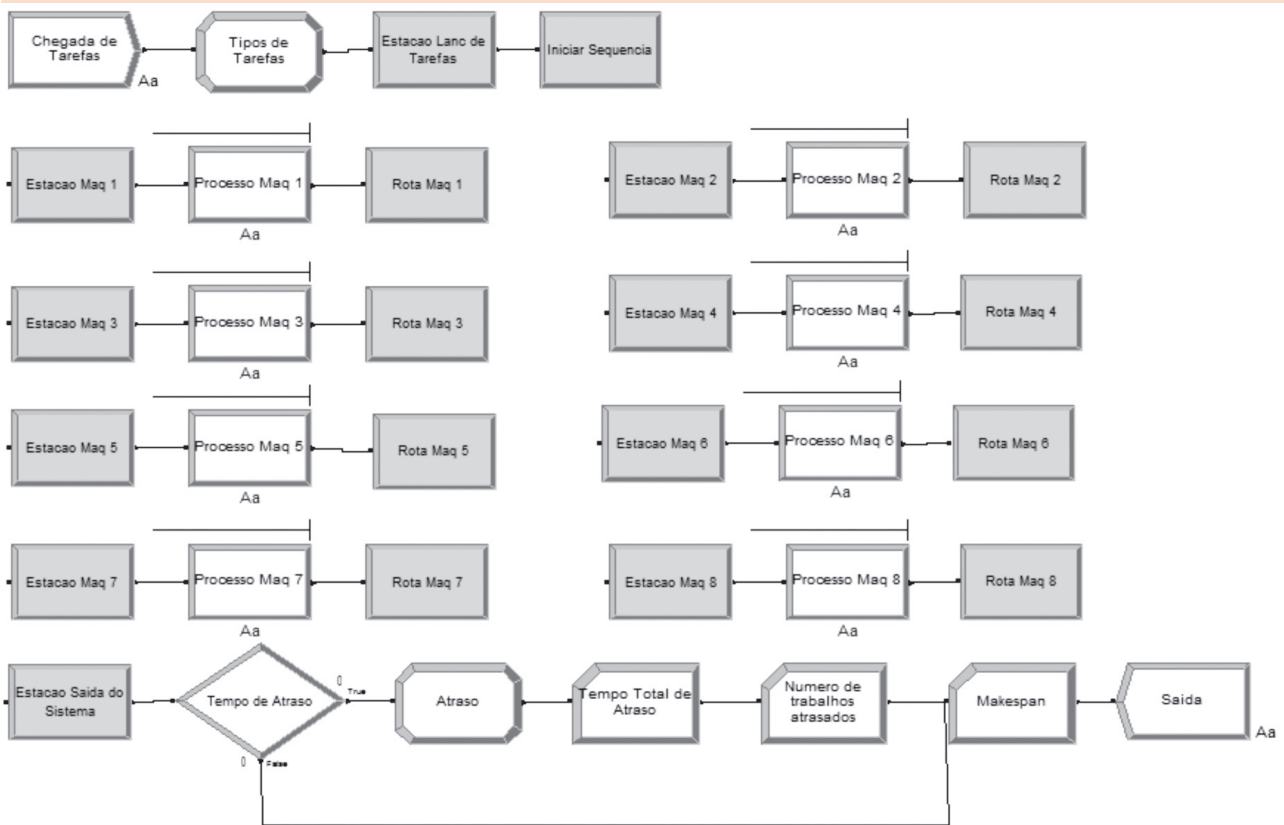


Figura 1: Modelo de simulação desenvolvido

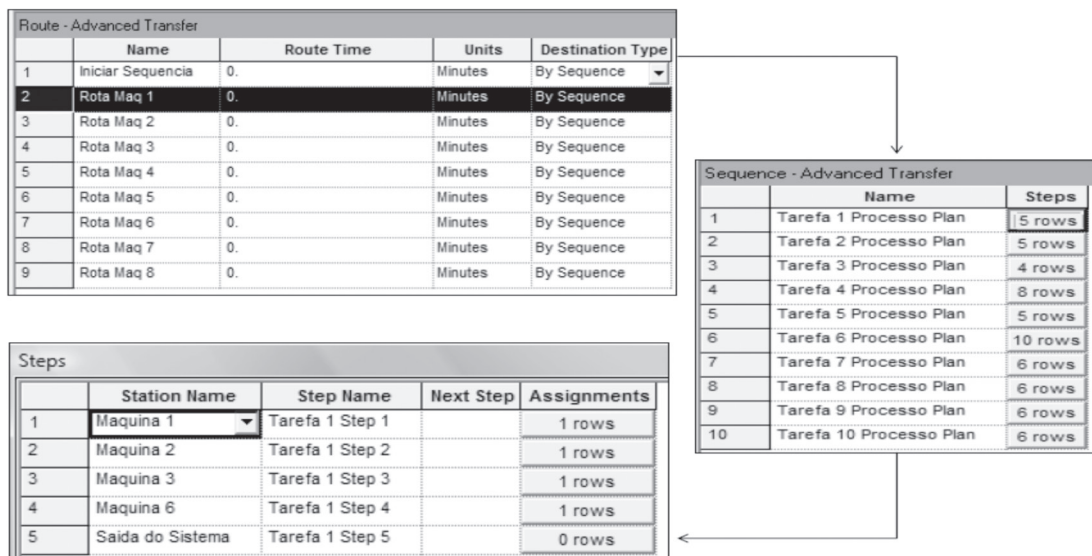


Figura 2: Exemplo de inserção de rotas no Arena®

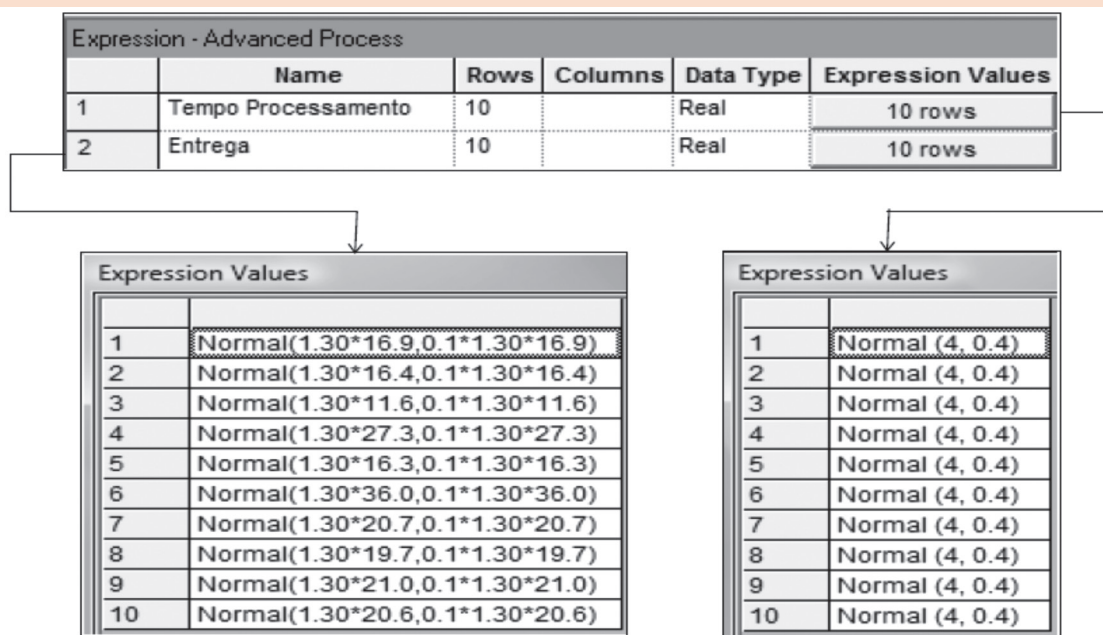


Figura 3: Configuração dos tempos de processamento

lo), conforme demonstrado na Figura 4. Caso seja necessário alterar ou incluir uma nova definição, pode-se adicionar um novo módulo, como foi feito nesta simulação, para atribuir uma nova condição válida para as ordens que estivessem em atraso.

As informações necessárias para que o simulador identifique quais regras de sequenciamento devem ser seguidas pelas ordens, de acordo com a

rota determinada em cada uma das máquinas, são definidas conforme Figura 5.

6 Resultados

Foram consideradas 20 replicações com 10.000 minutos cada uma. O número de replica-

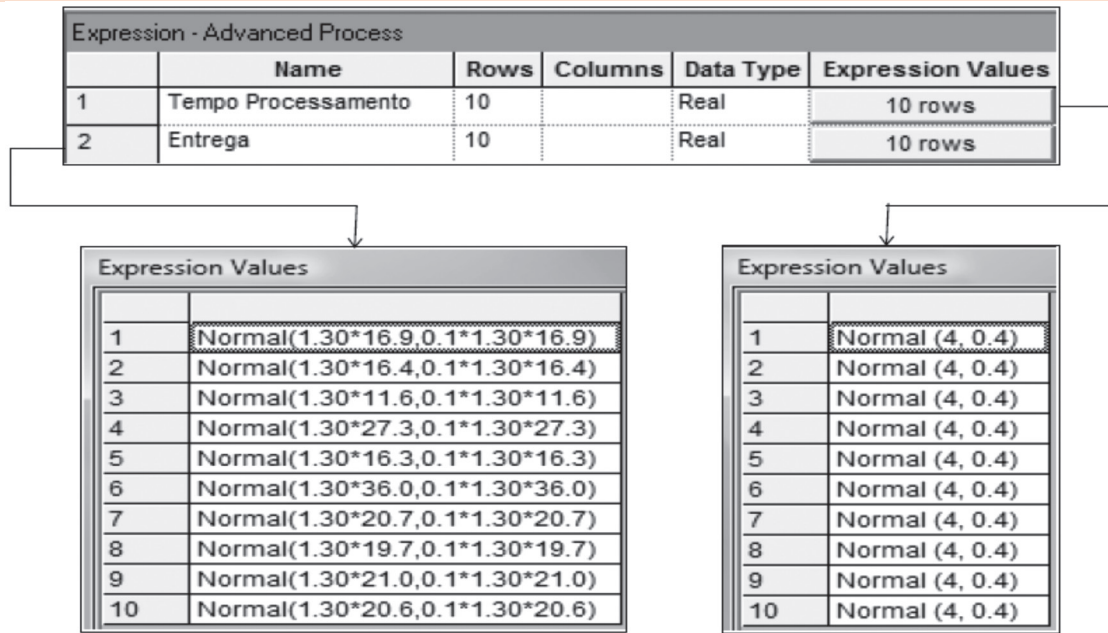


Figura 4: Definições dos atributos das ordens de produção

Queue - Basic Process					
	Name	Type	Attribute Name	Shared	Report Statistics
1	Processo Maq 1.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Processo Maq 2.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Processo Maq 3.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Processo Maq 4.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Processo Maq 5.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Processo Maq 6.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Processo Maq 7.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Processo Maq 8.Queue	Lowest Attribute Value	EDD	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 5: Identificação da ordem de sequenciamento simulada

ções foi validado pela análise de dados com uma confiança de 95% para cada uma das rodadas. A quantidade de minutos utilizada é suficiente para contemplar o tempo necessário para que a simulação entre no período de estabilidade. Diz-se que o sistema está estável quando o processo de produção entra em regime permanente, e eventuais variações causadas pelo *start-up* já foram eliminadas.

Os resultados obtidos com o modelo de simulação estão graficamente apresentados abaixo.

Considerando as medidas pertinentes ao desempenho (*Makespan*, Tempo Total de Atraso e o Número de Ordens Atrasadas) e a configuração dos dois ambientes (*Job Shop* e *Flow Shop*), esses resultados estão apresentados em duas subseções. Cada uma das subseções apresenta uma breve análise dos resultados alcançados.

6.1 Ambiente Job Shop

Para esse ambiente, as medidas de desempenhos estão representadas nas Figuras 6, 7 e 8

para Tempo Total de Atraso, Número de Ordens Atrasadas e *Makespan*, respectivamente.

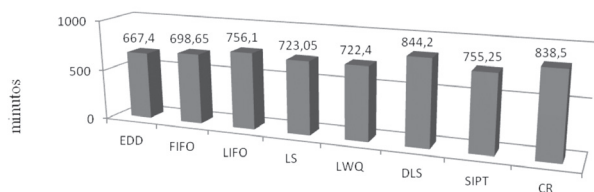


Figura 6: Tempo Total de Atraso - Job Shop

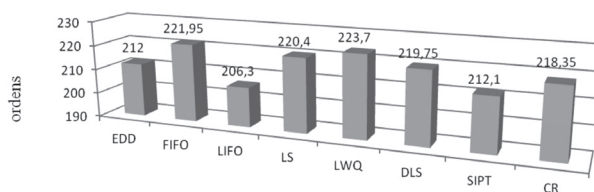


Figura 7: Número de Ordens Atrasadas - Job Shop

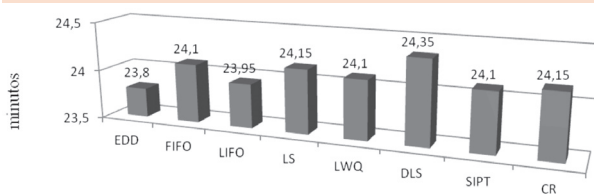


Figura 8: Makespan - Job Shop

Conforme as Figuras 6, 7 e 8, no ambiente *Job Shop*, as regras de sequenciamento que apresentaram um melhor desempenho foram EDD e LIFO. Os indicadores de desempenho, *Makespan* e Tempo total de Atrasos, mostraram melhores resultados com a regra EDD; entretanto, o Número de Ordens Atrasadas apresentou melhor desempenho com a LIFO.

Utilizando o intervalo de confiança de 95%, foram apresentadas as seguintes margens de erro: 0,18 para *Makespan* (EDD), 99,8 para Tempo Total de Atraso (EDD) e 10,66 para Número de Ordens Atrasadas (LIFO).

Em razão da diversidade dos sistemas de produção, é difícil encontrar uma regra de sequenciamento que seja apropriada para todas as situa-

ções. De fato, considerando o número de tarefas e máquinas utilizadas neste trabalho, o número de modos alternativos para sequenciar a produção é muito alto, podendo existir mais de um sequenciamento igualmente bom. Dessa forma, qualquer estudo comparativo deve necessariamente estabelecer os indicadores de desempenho a serem considerados, e identificar qual regra de sequenciamento fornece um melhor resultado para um determinado objetivo da programação.

A regra EDD apresentou uma superioridade, quando o sistema *Job Shop* foi considerado. Essa regra prioriza as ordens mais urgentes, ou seja, as tarefas são sequenciadas em ordem crescente de prazo de entrega prometido (*due date*). Portanto, a EDD tende naturalmente a reduzir atrasos na entrega. Entretanto, quando o indicador de desempenho Número de Ordens Atrasadas foi considerado o melhor resultado foi obtido com a regra LIFO. É importante lembrar que se trata de um ambiente *Job Shop* no qual as ordens de produção podem mover-se de um posto de trabalho para qualquer outro posto, podendo retornar a um posto já visitado. Além disso, as datas de entrega são geradas aleatoriamente segundo uma distribuição normal de probabilidade, com média e desvio-padrão proporcionais ao tempo de processamento de cada ordem. Assim, como as ordens que retornam a postos de trabalho já visitados (ordens 4, 6 e 7, Tabela 1) possuem tempos de processamento maior, os correspondentes valores de data de entrega podem apresentar um desvio-padrão elevado e, conseqüentemente, datas de entrega mais apertadas. Quando uma ordem com essas características chega a um posto de trabalho e é atendida por meio da regra LIFO a chance de ser entregue com atraso será menor.

Por outro lado, a regra EDD também não leva em consideração o tempo de processamento das ordens fazendo com que tarefas com grande potencial para rápida conclusão fiquem aguardando.

dando na fila. Portanto, essa regra pode não produzir os melhores resultados em situações nas quais há uma grande dinâmica de chegada de novas ordens com tempos menores, como é o caso do modelo desenvolvido neste trabalho, no qual os intervalos de tempo entre as chegadas das ordens são aleatórios e descritos por uma distribuição exponencial.

6.2 Ambiente *Flow Shop*

Para esse ambiente, as medidas de desempenho estão representadas nas Figuras 9, 10 e 11 para Tempo Total de Atraso, Número de Ordens Atrasadas e *Makespan*, respectivamente.

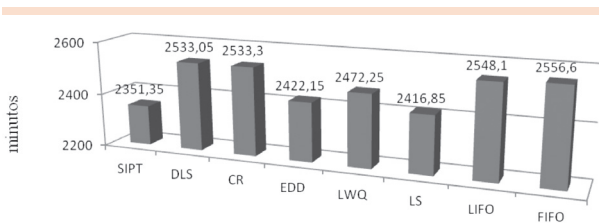


Figura 9: Tempo Total de Atraso - *Flow Shop*

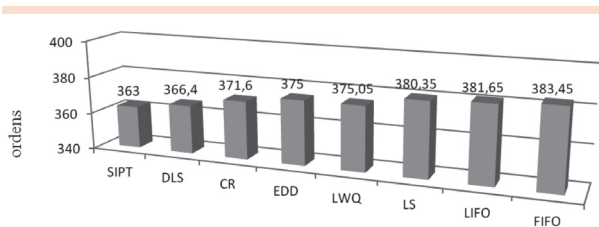


Figura 10: Número de Ordens Atrasadas - *Flow Shop*

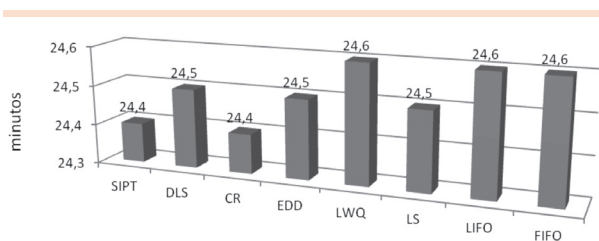


Figura 11: *Makespan* - *Flow Shop*

Conforme as Figuras 6, 7 e 8, no ambiente *Flow Shop*, a regra de sequenciamento SIPT

apresentou melhor desempenho para os três indicadores.

Utilizando o intervalo de confiança de 95%, foram apresentadas as seguintes margens de erros: 0,22 para *Makespan*, 121,61 para Tempo Total de Atraso e 9,54 para o Número total de Ordens Atrasadas.

No ambiente *Flow Shop*, as ordens podem mover-se apenas para os postos de trabalho à frente e, portanto, possui características diferentes do *Job Shop*. Nesse caso, a regra SIPT, na qual a prioridade é dada pelo menor tempo de processamento individual, apresentou o melhor resultado para os três indicadores. Segundo classificação apresentada na literatura (REID; SANDERS, 2005; TUBINO, 2007), trata-se de uma regra local, pois estabelece a prioridade com base apenas nas tarefas que estão esperando naquela estação de trabalho específica.

De acordo com Tubino (2007), essa regra tende a reduzir os estoques em processo, agilizando o carregamento das máquinas à frente e melhorando o nível de atendimento ao cliente, mas sofre com o mesmo problema apresentado pela regra EDD ao fazer com que ordens com tempos longos de processamento sejam sempre preteridas. Como nesse caso, não há retorno das ordens para estações de trabalho essa dificuldade não impactou os resultados. De fato, os resultados estão de acordo com a literatura (REID; SANDERS, 2005) que afirma que essa regra sempre minimiza o tempo médio de fluxo das tarefas, o atraso médio das tarefas e o número médio de tarefas no sistema.

7 Conclusão

Em razão da diversidade dos sistemas de produção, é difícil encontrar uma regra de sequenciamento que seja apropriada para todas as situações. De fato, considerando o número de tarefas e

máquinas utilizadas neste trabalho, o número de modos alternativos para sequenciar a produção é muito alto, podendo existir mais de um sequenciamento igualmente bom. Dessa forma, qualquer estudo comparativo deve necessariamente estabelecer os indicadores de desempenho a serem considerados, e identificar qual regra de sequenciamento fornece um melhor resultado para um determinado objetivo da programação. Assim, em primeiro lugar é necessário considerar quais indicadores de desempenho são mais importantes na escolha do sequenciamento da ordem de trabalho.

Neste estudo, consideraram-se três indicadores como os mais importantes: Tempo Total de Atraso, Número de Ordens Atrasadas e *Makespan*. Identificaram-se, em cada um deles, as regras por meio das quais se obtiveram os melhores resultados, conforme os ambientes analisados. Assim, para o indicador Tempo Total de Atraso, destacaram-se as regras EDD, no ambiente *Job shop*, e SIPT, no ambiente *Flow shop*; para o Número de Ordens Atrasadas, a regra LIFO, no *Job shop*, e a SIPT, no ambiente *Flow shop* e, por último, para o indicador *Makespan*, a regra EDD, no *Job shop*, e as regras SIPT e CR, no ambiente *Flow shop*.

Os dados demonstram que as regras de sequenciamento devem ser aplicadas de acordo com o ambiente e relevância dos indicadores.

É importante destacar que apesar de o modelo desenvolvido considerar um cenário de produção hipotético, pode ser facilmente adaptado para um ambiente real, modificando apropriadamente o número de estações de trabalho e ajustando as distribuições de probabilidade das chegadas de ordem e dos tempos de processamento por meio de uma coleta de dados. Essas adaptações podem ser facilmente realizadas nos módulos apresentados nas Figuras 3, 4 e 5.

Finalmente, salienta-se que a contemplação da aleatoriedade das chegadas e dos tempos de produção pode refletir mais adequadamente a realidade

de ambientes de manufatura nos quais a demanda é caracterizada por um elevado *mix* de produtos e lotes com tamanhos tendendo à unidade.

Referência

- AKASAWA, A. Aplicação da Simulação de Eventos Discretos como ferramenta integrada ao planejamento e programação da produção na manufatura ágil. Itajubá, 2007, 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção)– Universidade Federal de Itajubá. Minas Gerais, 2007.
- BAPTISTE, P.; FLAMINI, M.; SOURD, F. Lagrangian bounds for just-in-time job-shop scheduling. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 3, p. 906-915, 2008.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulation Operations Management research methodologies quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241-261, 2002.
- CHAN, F. T. S.; CHAN, H. K. Analysis of dynamic control strategies of an FMS under different scenarios. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, n. 20, p. 423-437, 2004.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações*. 2ª ed. São Paulo: Gráfica Palas Athena, 2006.
- COSTA, A. C. F.; JUNGLES, A. E. O mapeamento do fluxo de valor aplicado a uma fábrica de montagem de canetas simulada. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 26., 09 a 11 de outubro de 2006. *Anais...*, Fortaleza, CE: ABEPRO, 2006.
- GAITHER, N.; FRAZIER, G. *Administração da Produção e Operações*. 8. ed. São Paulo: Pioneira, 2002.
- KELTON, W. D.; SADOWSKI, R., P.; SADOWSKI, D. A. *Simulation with ARENA*. 2ª ed. Columbus, Ohio: McGraw Hill, 2000.
- MESQUITA, M. et al. Programação detalhada da produção. In: LUSTOSA, L. J. et al. *Planejamento e Controle da Produção*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.
- MONTEVECHI, J. A. B. et al. Análise comparativa entre regras heurísticas de sequenciamento da produção aplicada em job shop. *Produto & Produção*, v. 6, n. 2, p. 12-18, jun., 2002.

MOREIRA, M. R. Controlo input-output em job-shops: como as regras de decisões interagem e reagem a falhas nas máquinas. In: JORNADAS HISPANO-LUSAS DE GESTIÓN CIENTÍFICA - CONOCIMIENTO, INNOVACIÓN Y EMPRENDEDORES: CAMINHO AL FUTURO. 27., p. 2257-2569, 2007. *Actas...*

Logroño, Espanha: Fedra, Universidade de La Rioja, 2007

MOUELHI-CHIBANI, W.; PIERREVAL, H. Training a neural network to select dispatching rules in real time. *Computers & Industrial Engineering*, v. 58, n. 2, p. 249-256, 2010.

PONTES, H. L. J. ; YAMADA, M. C.; PORTO, A. J. V. Análise do arranjo físico de uma linha de montagem em uma empresa do setor de componentes automotivos utilizando simulação. In: CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA. 8., 23 a 25 de outubro de 2007. *Anais...* Cuzco, Peru: CIBIM, 2007.

REID, R. D.; SANDERS, N. R. *Gestão de operações*. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

SANTORO, M. C.; MESQUITA, M. A. The effect of the workload on due-date performance in job shop scheduling. *Brazilian Journal of Operations and Production Management*, v. 5, p. 75-88, 2008.

SIMS, M. J. An introduction to planning and scheduling with simulation. In: PROCEEDINGS OF THE 1997 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997 p. 67-69, Atlanta. *Proceedings...* Atlanta, GA: Winter Simulation Conference, 1997.

SURESH, K.N.; SRIDHARAN, R. Simulation modeling and analysis of tool sharing and part Scheduling decisions in single-stage multimachine flexible manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, n. 23, p. 361-370, 2007.

TUBINO, D. F. Planejamento e controle da produção: teoria e prática. São Paulo: Atlas, 2007.

VINOD, V.; SRIDHARAN, R. Scheduling a dynamic job shop production system with sequence-dependent setups: an experimental study. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, p. 435-449, 2008.

WATANABE, M.; IDA, K.; GEN, M. A genetic algorithm with modified crossover operator and search area adaptation for the job-shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, n. 48 p. 743-752, 2005.

XU, J.; ZHOU, X. A class of multi-objective expected value decision-making model with birandom coefficients and its application to flow shop scheduling problem. *Information Sciences*, n. 179, p. 2997-3017, 2009.

Recebido em 12 mar. 2012 / aprovado em 5 abr. 2012

Para referenciar este texto

SILVA, E. B. et al. Avaliação de regras de sequenciamento da produção em ambientes *Job shop* e *Flow shop* por meio de simulação computacional. *Exacta*, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 70-81, 2012.