

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

MÁRIO SÉRGIO CORRÊA DOS SANTOS

**A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS TEMPOS DE MOVIMENTAÇÃO E DA
VARIABILIDADE DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE
LOTES DE TRANSFERÊNCIA ENTRE DUAS MÁQUINAS**

São Bernardo do Campo
2014

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

MÁRIO SÉRGIO CORRÊA DOS SANTOS

**A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS TEMPOS DE MOVIMENTAÇÃO E DA
VARIABILIDADE DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE
LOTES DE TRANSFERÊNCIA ENTRE DUAS MÁQUINAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário da FEI para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica, Área de
Produção, orientado pelo Prof. Dr. Alexandre
Augusto Massote.

São Bernardo do Campo
2014

SANTOS, Mário Sérgio Correa dos

A influência da variação dos tempos de movimentação e da variabilidade dos tempos de operação no dimensionamento de lotes de transferência entre duas máquinas / Mário Sérgio Correa dos Santos. São Bernardo do Campo, 2014.

58 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote.

1. Simulação computacional. 2. Lot Streaming.
I. Souza, Michelly, orient. II. Título.

CDU 658.5.012.4



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Mário Sérgio Corrêa dos Santos

Matrícula: 212309-9

Título do Trabalho: A influência da variação dos tempos de movimentação e da variabilidade dos tempos de operação no dimensionamento de lotes de transferência entre duas máquinas.

Área de Concentração: Produção

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

Data da realização da defesa: 16/12/2014

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

São Bernardo do Campo, 16 de Dezembro de 2014.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote

Ass.: _____

Prof. Dr. Dário Henrique Alliprandini

Ass.: _____

Prof. Dr. André Luís Helleno

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

RESUMO

Muitos estudos têm abordado o problema de Lot Streaming com o objetivo de reduzir o tempo total de atravessamento de sistemas produtivos, no entanto, poucos trabalhos tratam esse problema considerando as atividades de transporte, e ainda menos o tratam de forma estocástica. Considerar o tempo de transporte e a variabilidade do sistema torna o problema mais real. Portanto este trabalho trata o problema de Lot Streaming de modo estocástico, por meio da simulação computacional, de modo a considerar a variação do tempo das atividades e também o tempo de transporte, com objetivo de verificar a influência destes no dimensionamento do lote de transferência em um sistema de manufatura composto por duas máquinas e um agente transportador. Após análise de diversos cenários conclui-se que a variabilidade dos tempos de processamento deve ser considerada, já que afeta diretamente o dimensionamento do lote de transferência.

Palavras chave: Simulação computacional; Lot Streaming.

ABSTRACT

Many works have been studying the Lot Streaming problem with the aim of reduce the makespan in production systems. However, few of them consider transport activities and even fewer treat the problem with a stochastic approach. When considered the transport time and the system variability, the problem is much more real. Therefore, this paper uses computer simulation to treat the Lot Streaming problem, considering the activities time variability and the transport time, to verify the influence of those variables in the transfer batch sizing, in a manufacturing production system with two machines and a transport agent. After analysis of several scenarios it is concluded that the variability in processing times must be considered since it directly affects the dimensioning of the batch transfer size.

Keywords: Computer simulation; Lot Streaming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

GRÁFICO 1 Representação do tempo de processamento de toda a produção em um único lote.....	16
GRÁFICO 2 Representação do tempo de processamento de produção com dois lotes	17
GRÁFICO 3 Representação do tempo de processamento de produção com quatro lotes	17
GRÁFICO 4 Representação do tempo de processamento de produção em lotes unitários.....	18
FIGURA 1 Relação entre os tipos de sub-lotes.....	20
FIGURA 2 Número de trabalhos sobre LS que consideram a movimentação.....	26
GRÁFICO 5 Distribuição normal.....	30
GRÁFICO 6 Distribuição exponencial.....	30
FIGURA 3 Metodologia da simulação.....	32
FIGURA 4 Roteiro de atividades para um trabalho de simulação	35
FIGURA 5 Modelo conceitual	36
GRÁFICO 7 Relação entre o tamanho do lote de transferência e a produtividade para o cenário determinístico com M1–2:00; M2 – 2:00 ; T – 2:00	41
GRÁFICO 8 Relação entre o tamanho do lote de transferência e a produtividade para o cenário determinístico com M1–2:00; M2–2:00 ; T – 4:00.....	41
GRÁFICO 9 Curva de aquecimento para o cenário com os parâmetros M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00, Distribuição normal com baixa variabilidade e lote de transferência igual a 10 unidades.....	42
GRÁFICO 10 Curva de aquecimento para o cenário com os parâmetros M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00, Distribuição normal com alta variabilidade e lote de transferência igual a 10 unidades	45
GRÁFICO 11 Curva de aquecimento para o cenário com os parâmetros M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00, Distribuição exponencial e lote de transferência igual a 10 unidades.....	47
GRÁFICO 12 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 2:00	49

GRÁFICO 13 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 4:00 ; T – 2:00	49
GRÁFICO 14 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 4:00 ; M2 – 2:00 ; T – 2:00	50
GRÁFICO 15 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 4:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00	50
GRÁFICO 16 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 4:00 ; T – 2:00	51
GRÁFICO 17 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 4:00 ; T – 4:00	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Tempo de processamento das máquinas.....	16
TABELA 2 Classificação de trabalhos de LS	22
TABELA 3 Classificação deste trabalho segundo Chang e Chiu	37
TABELA 4 Classificação deste trabalho segundo Segura et al.....	37
TABELA 5 Parâmetros considerados para construção dos cenários	38
TABELA 6 Cenários considerados	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Perguntas a serem respondidas	12
1.4	Metodologia	12
1.5	Limitações	13
1.6	Organização do trabalho	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	Lot Streaming	15
2.1.1	Classificação de um problema de Lot Streaming	18
2.1.2	Notações utilizadas para classificar um problema de Lot Streaming	22
2.1.3	Evolução dos trabalhos de Lot Streaming.....	23
2.2	Simulação computacional	28
2.2.1	Modelos estocásticos e modelos determinísticos.....	29
2.2.2	Vantagens da simulação.....	30
2.2.3	Softwares de simulação.....	31
2.2.4	Etapas para elaboração de um trabalho de simulação.....	32
2.2.5	Aplicações da simulação na manufatura	33
3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	35
3.1	Definição dos parâmetros	36
3.2	Modelo conceitual	36
3.3	Cenários considerados	38
3.4	Verificação do modelo	40
3.5	Coleta de resultados	42
3.5.1	Normal com baixa variabilidade	42
3.5.2	Normal com alta variabilidade	45
3.5.3	Exponencial.....	46
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
5	CONCLUSÕES	52

REFERÊNCIAS 53

APÊNDICE 58

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Toyota de Produção é um sistema de produção desenvolvido no Japão no período pós-2ª guerra, que surgiu a partir da necessidade de produção de pequenas quantidades e de altas variedades de produtos. O potencial para produção em massa nem sempre é uma opção da empresa, mas esta pode optar pela produção em pequenos ou grandes lotes. Acredita-se que produção em pequenos lotes é preferível mesmo para a produção em massa, porque reduz e controla a geração de estoques, enquanto a produção em grandes lotes sempre resulta em estoque excessivo por um determinado período de tempo (SHINGO, 1996).

O interesse pelo Lean Manufacturing, segundo Chen e Steiner (1997), acarretou diversos estudos de dimensionamento do número de lotes produção, e de Lot Streaming, que é o processo de usar lotes de transferência para movimentar parte produzida para as próximas etapas, de modo que o tempo total de produção e o estoque em processo sejam reduzidos.

Chang e Chiu (2005) realizaram uma revisão da literatura com 67 trabalhos de Lot Streaming publicados entre 1976 e 2004, e concluíram que a maioria dos estudos de Lot Streaming que visam a redução do tempo total de produção não consideram as atividades de transporte, e dos que consideram, a maioria foi desenvolvida com tempos determinísticos, sem levar em conta a variabilidade do sistema. Os autores mencionam que estudos futuros deveriam considerar processos estocásticos e tempos de transporte em função das quantidades transportadas. Edis et al. (2007) consideram que incluir as atividades de transporte ao problema de Lot Streaming o torna mais real, e que além disso, sistemas reais possuem comportamento estocástico.

Muitos problemas de Lot Streaming foram abordados por modelos matemáticos, sendo que poucos foram desenvolvidos com uso da simulação computacional, como os trabalhos de Cheraghi et al. (2011) e Edis e Ornek (2009). O uso da simulação computacional permite que as variabilidades, presentes em situações reais, sejam melhor representadas.

Considerando a importância do estudo do problema de Lot Streaming e a necessidade de que este seja abordado de forma a considerar a variabilidade e as atividades de transporte dos sistemas, este trabalho faz uso da simulação computacional para abordar o problema considerando processos estocásticos e tempos de transporte.

1.1 Objetivo

O objetivo é verificar como a variação dos tempos de movimentação e a variabilidade dos tempos de processamento influenciam no dimensionamento do lote de transferência ideal entre duas máquinas, tendo como critério a produtividade (peças/hora) em um sistema de manufatura composto por duas máquinas e um agente transportador.

1.2 Justificativa

O conceito de criar lotes de produção de modo a permitir que as operações em diferentes máquinas ocorram de maneira simultânea (lot streaming) surgiu na década de 1960. Os primeiros trabalhos acadêmicos nesta área apresentavam diversas restrições, como por exemplo, não considerar atividades de setup e só considerar a existência de duas ou três máquinas. Estes trabalhos só podiam ser aplicados aos casos reais em situações muito específicas. Desde então pesquisadores têm buscado considerar cada vez mais fatores reais, de modo que as soluções encontradas têm se tornando mais abrangentes e menos sujeitas a condições particulares. Nejadi et al. (2014) e Kang et al. (2014) são exemplos de trabalhos que adicionaram novos fatores ao problema de lot streaming e conseguiram aumentar a aplicabilidade dos trabalhos desta área.

Segundo Edis et al. (2007), a maioria dos estudos relacionados a lot streaming consideram todos os tempos como sendo determinísticos. Entretanto, aplicações em sistemas reais exigem que o comportamento estocástico seja considerado e, portanto, deveriam ser modeladas desta maneira. Ainda segundo Edis et al. (2007), poucos trabalhos em lot streaming consideram o tempo para transportar os produtos entre as operações, e este tempo deveria ser considerado, já que, de acordo com Shingo (1996), os transportes representam tipicamente 45% dos custos de mão-de-obra em um processo.

Considerando os problemas de lot streaming que, apesar de terem sido amplamente estudados não têm ainda uma abordagem estocástica, este trabalho tem o objetivo de mensurar diferenças entre os tempos determinísticos e estocásticos em problemas de lot streaming.

1.3 Perguntas a serem respondidas

- a) a variabilidade dos tempos de processamento e o tempo de transporte, em um sistema de manufatura composto por duas máquinas e um agente transportador, alteram o tamanho ideal do lote de transferência?
- b) a organização do sistema, ou seja, o nível de variabilidade presente no sistema de manufatura, influencia o dimensionamento do lote de transferência?

1.4 Metodologia

Caracteriza-se como quantitativa uma pesquisa científica que envolve coleta e análise de dados de variáveis predeterminadas, normalmente com tratamento estatístico e alto índice de padronização, na qual o pesquisador assume papel neutro em relação ao objeto de estudo. Dentre os tipos de pesquisa científica, encontra-se a pesquisa experimental, que busca explicar as causas de determinado evento e manipula deliberadamente algum aspecto da realidade (APPOLINÁRIO, 2008).

Segundo Appolinário (2008), um trabalho científico contempla primeiramente a determinação do tema ou problema a ser investigado, para que objetivos que respondam ao problema sejam delineados, assim como as hipóteses da pesquisa. Em seguida, deve-se determinar o tipo de pesquisa que melhor abordará o problema, construir uma revisão da literatura, com levantamento bibliográfico aprofundado e escolher os sujeitos da pesquisa. Instrumentos e procedimentos devem ser determinados, e os dados devem ser coletados e analisados. Os resultados obtidos com a pesquisa devem ser discutidos e uma resposta conclusiva ao problema deve ser apresentada, de modo a confirmar ou refutar as hipóteses estabelecidas.

Os métodos de pesquisa mais comuns na engenharia de produção são: desenvolvimento teórico conceitual, estudo de caso, levantamento tipo survey, modelagem e simulação, pesquisa-ação, pesquisa bibliográfica ou revisão da literatura e pesquisas experimentais. A Modelagem e Simulação é um método de pesquisa que compreende o uso de técnicas matemáticas e computacionais para descrever o funcionamento de um sistema (MIGUEL, 2007).

Este trabalho é, então, de natureza quantitativa e o método de pesquisa adotado é o de Modelagem e Simulação, que começa com a definição de um problema, das variáveis e parâmetros do sistema estudado, e com isso se pode criar o modelo conceitual, que contempla a interação das variáveis e as entradas e saídas do sistema. O modelo de simulação computacional é criado com base no modelo conceitual e deve ser verificado, certificando-se de que seus dados de entrada e saída estão coerentes, e validado, confirmando-se que os resultados obtidos com o modelo de simulação são coerentes com os obtidos no sistema real. Finalmente, os resultados da simulação podem ser colhidos e analisados (CHWIF; MEDINA, 2010).

1.5 Limitações

Este estudo se limita a analisar um ambiente do tipo flow shop, composto por duas máquinas e um agente transportador. Não foram considerados os tempos de setup, e nem um comportamento estocástico para variação dos tempos de transporte nos cenários analisados.

1.6 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos: introdução, revisão da literatura, desenvolvimento, análise dos resultados e conclusões.

A primeira seção apresenta o problema de dimensionamento de lote, os objetivos geral e específicos deste trabalho, assim como a metodologia de estudo escolhida para alcançá-los.

A segunda seção deste trabalho é uma revisão da literatura, na qual o estado da arte foi levantado e trabalhos desenvolvidos nesta área são apresentados, assim como suas conclusões e contribuições.

A terceira seção traz o desenvolvimento deste estudo de modelagem e simulação, a definição dos parâmetros, a construção do modelo conceitual e do modelo computacional, assim como a coleta dos dados.

A quarta seção apresenta os resultados obtidos com a simulação e também a análise dos resultados.

A quinta seção contempla as conclusões deste trabalho, bem como as contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi realizada em duas partes, sendo que a primeira apresenta a definição da técnica de Lot Streaming, seus objetivos, vantagens e principais componentes. Também é apresentada uma revisão bibliográfica de estudos e trabalhos sobre o tema, que foi realizada buscando observar se consideraram ou não as atividades de transporte e a variação estocástica nos tempos utilizados.

A segunda parte trata da simulação computacional de eventos discretos e como ela tem sido aplicada na comparação de técnicas na manufatura e nos problemas de Lot Streaming.

2.1 Lot Streaming

Reiter (1966) introduziu o termo Lot Streaming (LS) como sendo o processo de dividir uma produção em lotes, de modo que a etapa mais lenta do processo não postergue o início do trabalho nas etapas seguintes. Chen e Steiner (1995) definem que o LS é o processo de usar lotes de transferência para movimentar parte produzida para as próximas etapas, objetivando que o tempo total de produção e o estoque em processo sejam reduzidos. Potts e Baker (1989) definem ainda o LS como o processo de divisão do trabalho em sub-lotes (SL), permitindo que as operações sejam simultâneas.

Por exemplo, uma linha de produção composta por três máquinas em sequência e que precisa produzir 100 unidades de um roduto, tem os tempos de produção especificados na tabela 1, e tempos de movimentação não são considerados. O objetivo é produzir todas as peças no menor tempo possível. Tal medida de desempenho é chamada de tempo total de atravessamento, em inglês makespan, definido por Çentikaya (2005) como o tempo total para produzir todos os pedidos, isto é, o tempo que se passa entre o momento em que o primeiro produto inicia sua produção na primeira máquina até o instante em que o último produto termina sua produção na última máquina.

Tabela 1 Tempo de processamento das máquinas

Máquina	Tempo (segundos / peça)
1	1
2	2
3	3

Fonte: Autor

Se não houver a sobreposição das operações, ou seja, se as máquinas não forem usadas simultaneamente, então o tempo total de atravessamento será de 600 segundos, conforme mostra o gráfico 1.

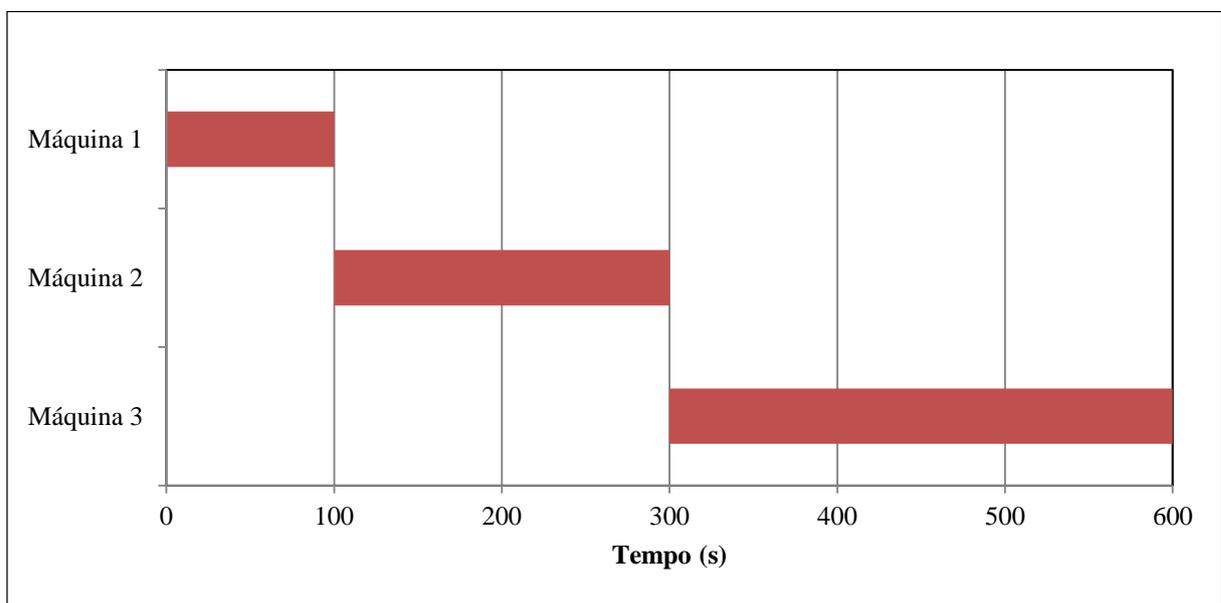


Gráfico 1 Representação do tempo de processamento de toda a produção em um único lote

Fonte: Autor

Entretanto, se a produção for realizada em dois lotes de 50 peças cada, então a máquina 2 pode iniciar sua produção 50 segundos após a máquina 1 ter começado a funcionar, e o tempo total de atravessamento será de 450 segundos, conforme gráfico 2.

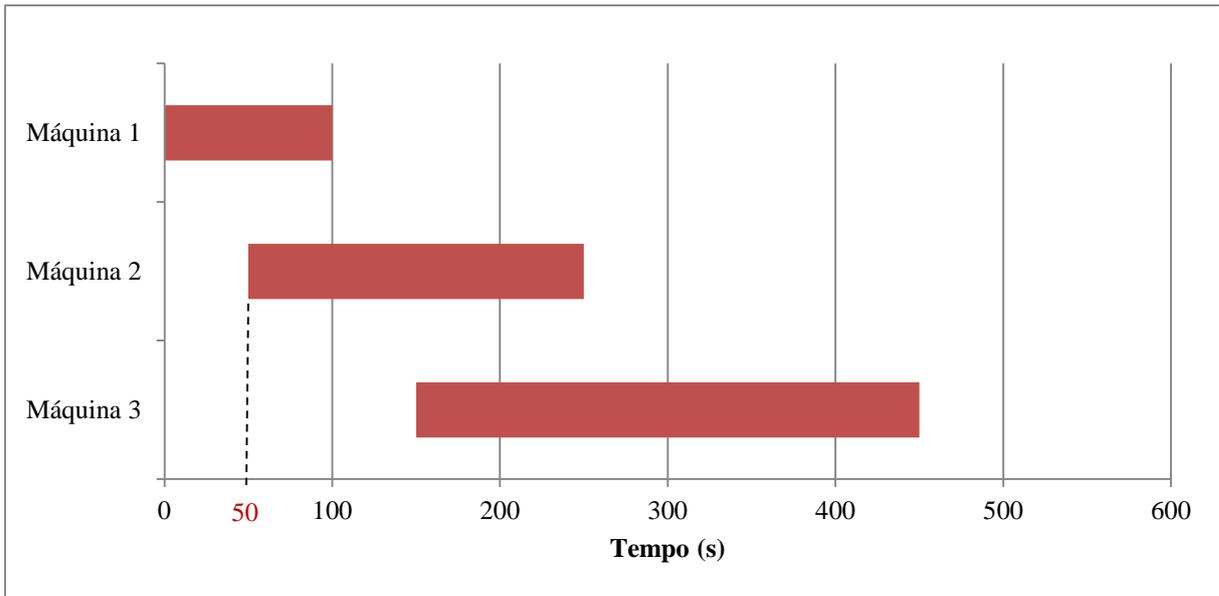


Gráfico 2 Representação do tempo de processamento de produção com dois lotes
Fonte: Autor

O makespan para quatro lotes de 25 peças é de 375 segundos e pode ser observado no gráfico 3. Uma redução de 37,5%, 75 segundos, em relação ao cenário sem LS.

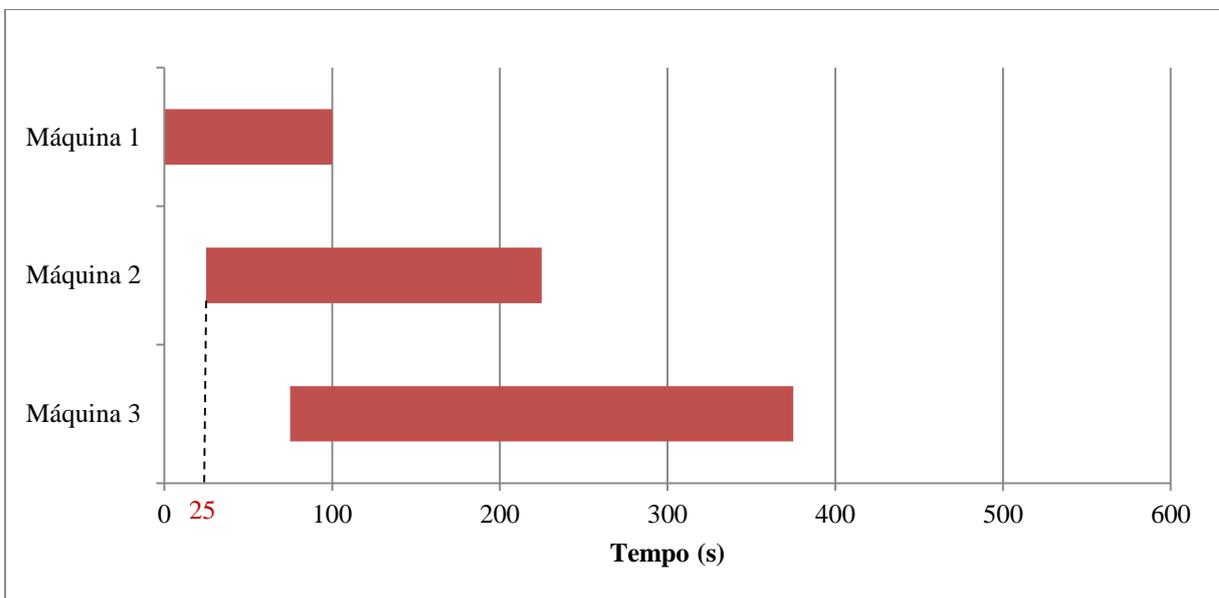


Gráfico 3 Representação do tempo de processamento de produção com quatro lotes
Fonte: Autor

Se a produção em lotes unitários for utilizada, então, será obtido o tempo de atravessamento de 301 segundos, que é o menor tempo possível, conforme observado no gráfico 4.

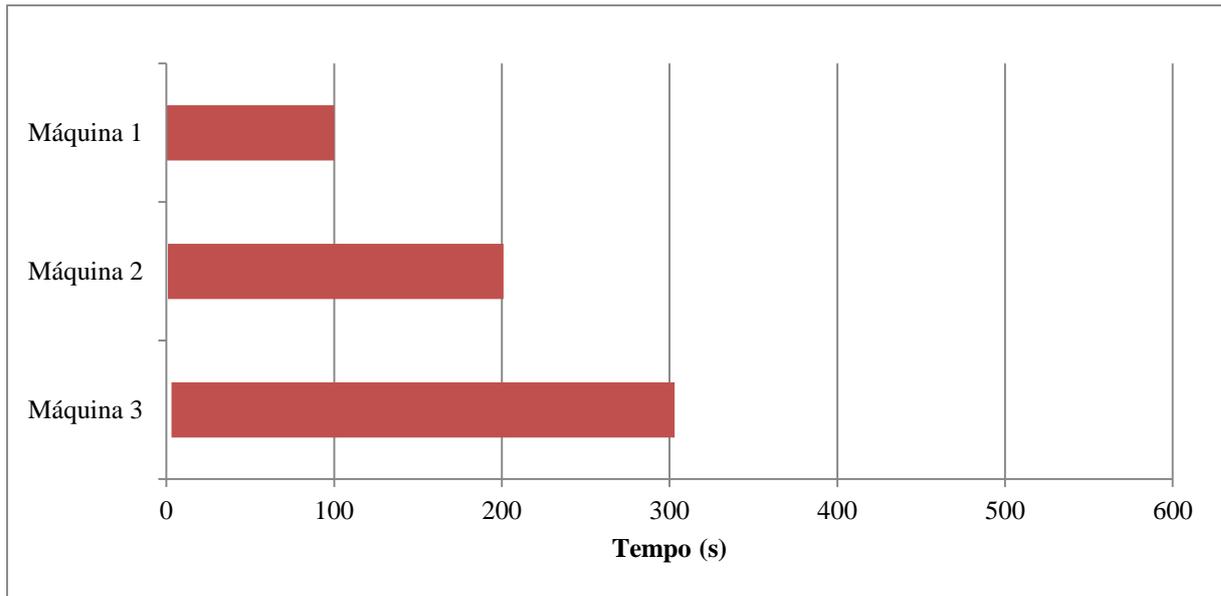


Gráfico 4 Representação do tempo de processamento de produção em lotes unitários
Fonte: Autor

O exemplo ilustrado mostra a possibilidade de redução de tempo proporcionada quando se utiliza a técnica de LS. Este exemplo, porém, é simplista em diversos aspectos, já que sistemas reais de produção estarão sujeitos, entre outros, à capacidade máxima de estoques entre as máquinas e tempo de movimentação das peças entre as operações.

Edis et al. (2007) afirmam que se não forem considerados o tempo de setup e o tempo das atividades de transporte, então o tempo total de atravessamento é minimizado pela utilização de lotes unitários, entretanto quando estas atividades são consideradas o cálculo do lote ideal se faz necessário (EDIS et al., 2007).

Zhang et al., (2005, apud Mortezaei e Zulkifli, 2013) afirmam que os problemas de LS geralmente envolvem calcular as seguintes informações:

- a) em quantos sub-lotes (SL) um lote de produção será dividido;
- b) quais serão as quantidades presentes em cada SL;
- c) em que sequência os SLs serão processados.

2.1.1 Classificação de um problema de Lot Streaming

Os problemas de LS podem ser classificados em três categorias: a primeira referente às condições do sistema, a segunda com as características do sub-lote e a terceira para tratar dos

indicadores de desempenho. Todas elas podem se dividir em diversas subcategorias, que são exploradas a seguir.

2.1.1.1 Características do sistema

Os sistemas de produção considerados em trabalhos de LS apresentam características que definem o tipo da solução a ser adotada, o grau de dificuldade do problema e, por vezes, apresentam restrições adicionais a serem consideradas. As principais características do sistema são o número de produtos diferentes que serão contemplados, o tipo da produção e as atividades envolvidas.

Neste trabalho será considerado um produto sendo realizado em uma produção do tipo flow shop composta por duas máquinas e que considere as atividades de transporte entre as operações.

2.1.1.2 Características dos sub-lotes

Chen e Steiner (1995), Potts e Baker (1989) e Sen et al. (1998) classificam os lotes resultantes do processo de LS entre consistentes e variáveis. Ao contrário dos lotes variáveis, os lotes consistentes não alteram o seu tamanho entre as etapas do processo.

Dentre as diversas combinações de sub-lotes (SL) consistentes existe uma em que todos os sub-lotes são iguais para o mesmo produto, ou seja, além de não variarem o seu tamanho entre as etapas não o variam entre si (SEN et al., 1998). Finalmente os sub-lotes iguais podem ser ainda chamados de fixos, quando todos os SL de diferentes produtos têm o mesmo tamanho e não variam entre as operações (EDIS et al., 2007). A figura 1 explica as relações de dominância entre as características mencionadas.

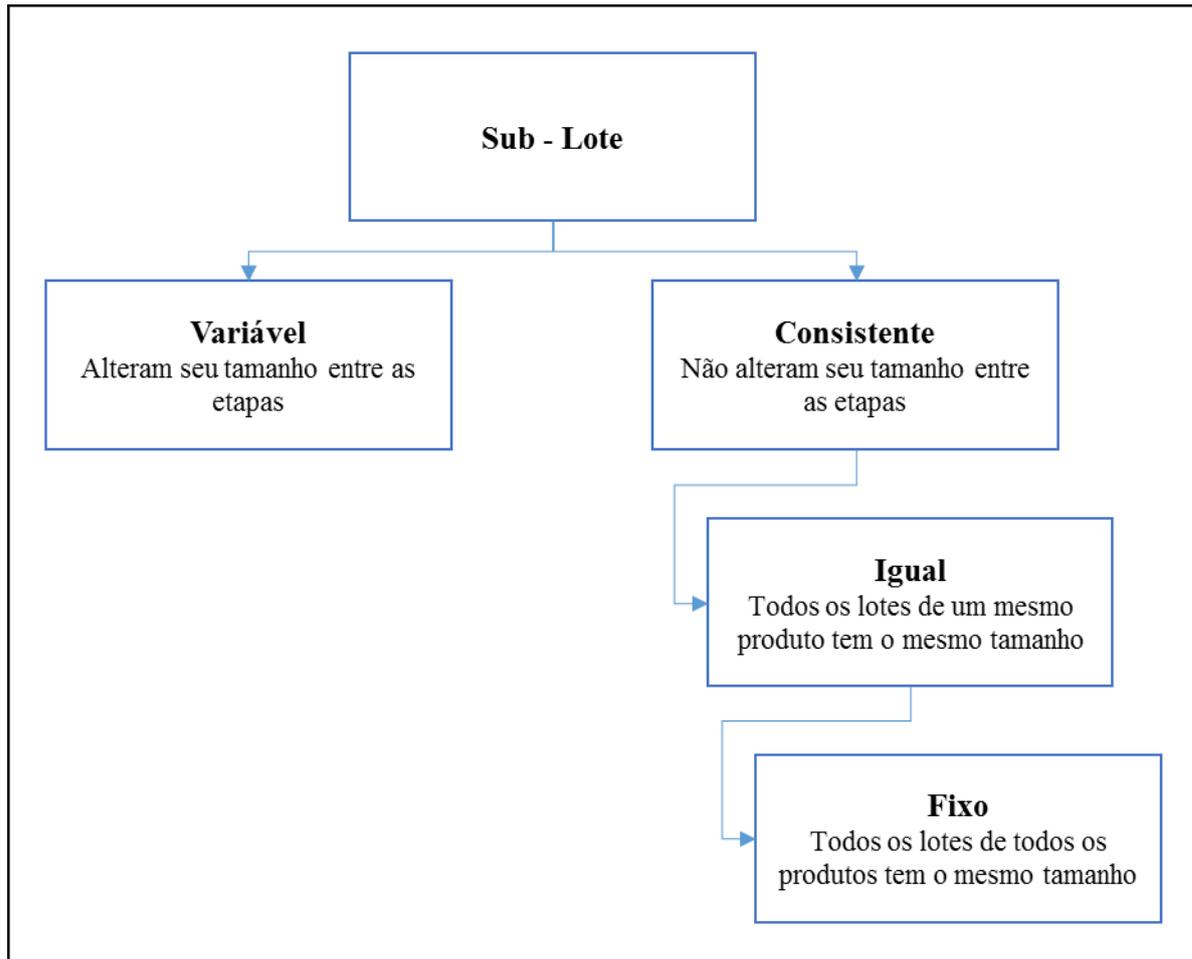


Figura 1 Relação entre os tipos de sub-lotes
Fonte: Autor

Outra classificação referente ao tamanho do sub-lote é o seu grau de divisão, o SL pode ter um número inteiro de peças, neste caso chamado de lote discreto, ou pode ter um número fracionário de peças e ser chamado de contínuo (TRIETSCH; BAKER, 1993).

Sub-lotes contínuos geralmente são resultado de cálculos em programação linear não inteira e precisam ser arredondados para que possam ser utilizados em situações reais; já sub-lotes com um tamanho discreto são números naturais.

Um problema de programação linear que inclua a restrição de que as variáveis sejam inteiras é um problema de programação linear inteira (GENOVA; GULIASHKI, 2011). Quando apenas números inteiros são permitidos o número de possíveis soluções é reduzido, porém, ao contrário do que se poderia deduzir, o problema fica mais difícil de ser solucionado (HILLIER; LIEBERMAN, 2010). Em problemas de Lot Streaming, o tamanho do lote pode ter um valor inteiro e ser chamado de lote discreto ou ter um valor fracionário e ser chamado de lote contínuo.

2.1.1.3 Medidas de desempenho

As medidas de desempenho para trabalhos de LS podem ser divididas entre medidas de custo e medidas de velocidade (CHANG; CHIU, 2005).

O principal critério de desempenho para o custo é o custo total da produção, o qual pode ser composto por todos ou uma combinação dos seguintes fatores:

- a) Custo dos estoques intermediários;
- b) Custo dos setups;
- c) Custo de movimentação;
- d) Custo do estoque de produtos acabados;
- e) Custos relacionados ao tempo (ex.: energia para manter o maquinário ligado).

A principal medida de desempenho para a velocidade é o tempo total de atravessamento (makespan) que, segundo Slack et al. (2009), pode ser uma medida substitutiva para desperdício em processos, pois quanto mais tempo os itens forem mantidos em estoque, em movimento ou em qualquer outra atividade que não agrega valor, mais tempo levarão para seguirem ao longo do processo, ou seja, maior será o tempo de atravessamento. Olhar para o que acontece com os itens dentro de um processo e ao longo da cadeia é um bom método para identificar as fontes dos desperdícios (SLACK et al., 2009).

Segundo Sen et al. (1998), um importante aspecto da modelagem de um problema de LS é o tempo em que as partes saem da última máquina e ficam disponíveis para saírem do processo. Potts e van Wassenhover (1992) propuseram modelos que consideram três tempos distintos:

- a) Tempo para processar todo o lote: quando todas as partes do lote passarem pela última máquina do processo;
- b) Tempo para processar todo o sub-lote: cada sub-lote pode sair do processo independentemente, quando todas as suas partes passarem pela última máquina;
- c) Tempo para processar uma única parte: cada parte pode sair do sistema assim que for processada pela última máquina.

Outros critérios de tempo utilizados são a média do tempo de atravessamento de cada uma das peças e a soma do tempo total de atravessamento de cada uma das peças.

2.1.2 Notações utilizadas para classificar um problema de Lot Streaming

Chang e Chiu (2005) desenvolveram uma notação composta por sete elementos ordenados, que permitem definir um problema de LS. Tal notação é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 Classificação de trabalhos de LS

1º nível	2º nível	3º nível
Configurações do sistema (α)	Tipo da produção (α_1)	Flow shop (F_m)
		Job shop (J_m)
		Open shop (O_m)
		Arborescent Shop (T_m)
	Número de produtos (α_2)	Um produto (L_1)
		Múltiplos produtos (L_n)
Características relativas aos sub-lotes (β)	Tipo do sub-lote (β_1)	Sub-lotes iguais (E)
		Sub-lotes consistentes (C)
		Sub-lotes variáveis (V)
	Divisão do tamanho do sub-lote (β_2)	Sub-lotes contínuos (R)
		Sub-lotes discretos (A)
	Continuidade da operação (β_3)	Sub-lotes não podem esperar (I_{no})
		Sub-lotes podem esperar (I)
	Atividades envolvidas (β_4)	Setup ($S_{(-,-)}, S_{(A,-)}, S_{(-,D)}, S_{(A,D)}$) Para modelos de tempo e (S) para modelos de custo
		Produção (P) para modelos de tempo ou ($P_{(-,JP,-)}, P_{(-,JP,FG)}, P_{(IM,JP,FG)}$) para custo
		Transporte ($M_{c(w)}^{\rightarrow}$)
Medição do desempenho (γ)	Critério de desempenho (γ_1)	Para modelos de tempo:
		Tempo total de atravessamento (C_{max})
		Tempo médio de atravessamento (\bar{F})
		Soma de todos os tempos de atravessamento ($\sum F$)
		Atraso médio (\bar{T})
		Número de trabalhos atrasados (n_T)
		Soma de dias em atraso ($\sum C - d $)
		Para modelos de custo:
		Custo total (TC)
		Custo total ($TC(C_{max}, K)$)

Fonte: Autor “adaptado de” Chang e Chiu, 2005.

Segura et al. (2012) também desenvolveram uma notação para classificar os problemas de LS que tem como critério de desempenho o tempo total de atravessamento (makespan), a notação é composta pelo agrupamento dos seguintes elementos, separados por vírgulas:

- a) Número de máquinas;
- b) Número de produtos;
- c) Tipo do sub-lote;
- d) Condição de espera;
- e) Tamanho do sub-lote;
- f) Setup e demais condições especiais.

2.1.3 Evolução dos trabalhos de Lot Streaming

Potts e Baker (1989) observaram, por meio da programação linear, que quando o número de etapas no processo é dois ou três, os sub-lotes consistentes sempre trazem uma solução ótima, ou seja, o menor tempo de atravessamento do processo. Portanto, neste caso, os sub-lotes consistentes não tem nenhuma desvantagem em relação aos variáveis. Também foi provado neste trabalho que a divisão em sub-lotes consistentes é, no máximo, 53% mais eficiente do que a divisão por sub-lotes iguais, e, no caso de um processo com duas etapas, é, no máximo, 9%. Segundo Chen e Steiner (1995), em certos ambientes, pode ser mais interessante dividir a produção em sub-lotes iguais devido a sua simplicidade operacional.

Trietsch e Baker (1993) introduziram um modelo que considera a existência de um agente transportador com capacidade limitada, operando entre duas máquinas em um processo. Observaram que, quando é assumido que o tempo de ciclo da segunda máquina é maior que o da primeira, o primeiro sub-lote deve ter quantidade suficiente para que a segunda máquina continue trabalhando até que o transportador retorne com mais peças.

Vickson (1995) explica o critério preempted no qual sub-lotes de um produto podem ser misturados aos de outro. Ele analisa em seu trabalho o problema de Lot Streaming para múltiplos produtos em um processo composto por duas máquinas em série, considera os tempos de setup e restringe o seu trabalho assumindo que o número de sub-lotes para cada produto é conhecido no início da produção. Em seu trabalho, considera que o tempo de transporte é função do número de peças sendo transportadas. Vickson mostrou também que quando se restringe a

possibilidade de misturar sub-lotes de diferentes tipos (preempted), então, no cenário proposto, o problema de Lot Streaming passa a ser um problema de sequenciamento, e para resolvê-lo foi apresentado um método capaz de encontrar a melhor solução quando se permite sub-lotes contínuos e um algoritmo rápido, para os casos em que os lotes devem ser discretos (VICKSON, 1995).

Em um processo com qualquer número de etapas, Trietsch e Baker (1993) mostraram que o tempo de atravessamento ótimo encontrado, considerando-se sub-lotes contínuos, serve de base mínima de comparação para o tempo encontrado, considerando-se os discretos, ou seja, o tempo de atravessamento obtido com sub-lotes discretos pode ser igual ao obtido com sub-lotes contínuos, mas nunca melhor.

Chen e Steiner (1995) construíram um modelo de programação linear que permitiu observar que os resultados obtidos em tempo de atravessamento para sub-lotes com números inteiros (discretos) são essencialmente os mesmos para sub-lotes fracionados (contínuos), no caso de um processo com duas etapas.

Baker (1995) buscou a solução ótima para o Lot Streaming, considerando um cenário com duas máquinas e setups dos tipos acoplado e desacoplado. Em seu trabalho, além de propor maneiras eficientes de programar a produção, Baker (1995) afirma que os novos problemas de sequenciamento e Lot Streaming geralmente começam com a consideração de apenas duas máquinas, e a partir desses modelos se obtém conhecimento necessário para melhor investigar os processos com mais de duas etapas. Lageweg (1978, apud BAKER, 1995) diz que as soluções para o problema de duas máquinas formam as bases para algoritmos mais genéricos.

Kim et al. (1997) determinaram o melhor sequenciamento para o caso de um processo com duas máquinas iguais e paralelas, de modo a obter o tempo de atravessamento ótimo. Foram considerados dois tipos de setup, o que necessita de uma peça para ser realizado e o que pode ser antecipado, ou seja, pode ser feito enquanto a última peça ainda está sendo trabalhada pela máquina anterior.

Şen et al. (1997) analisaram a diferença de performance de um sistema com sub-lotes consistentes e variáveis, por meio de programação linear. Foi observado que, quando o tempo de ciclo da segunda máquina é menor ou igual ao da primeira, os sub-lotes de mesmo tamanho fornecem o melhor tempo de atravessamento. Mostrou ainda que os sub-lotes consistentes tem um desempenho quase tão bom quanto os variáveis.

Sriskandarajah e Wagneur (1999) introduziram o critério no-wait em um trabalho com o objetivo de minimizar o tempo de atravessamento de um processo com duas máquinas e setup,

por meio de uma heurística. O no-wait ocorre quando os sub-lotes não podem esperar entre as máquinas e, uma vez iniciada a produção, devem passar continuamente por todas as máquinas.

Langevin et al. (1999) apresentaram um método para determinar o melhor tamanho de lote de transferência, que minimizasse a soma total dos custos, por meio de Programação Linear. Foram considerados quatro tipos de custo: de movimentação, de paletização, de armazenagem e da máquina. No modelo construído havia duas máquinas e dois tipos de peças a serem transportadas, mas apenas peças do mesmo tipo poderiam ser transportadas juntas. O modelo foi capaz de determinar a solução ótima, mas as variáveis eram determinísticas.

Checolli e Monteiro (2000) descreveram e analisaram as etapas de implementação da metodologia de Tambor Pulmão Corda em uma empresa de grande porte, utilizando-se de um estudo de caso, e observaram que a redução do lote de transferência de 500 para 100 peças permitiu reduzir o lead time em 29%, diminuir o estoque em processo e também o peso do recipiente.

Chiu et al. (2004) realizaram um estudo com o objetivo de encontrar o melhor tempo de início para cada sub-lote, o melhor número de lotes de transporte e a melhor alocação de lotes de transferência variáveis, para reduzir o custo total, incluindo custos relacionados ao tempo de atravessamento e transporte. Foram propostas duas heurísticas para resolver de forma eficiente o problema, considerando-se setups, sub-lotes inteiros e o tempo que um agente transportador consome para levar peças e para retornar vazio. Chiu et al. (2004) concluíram que as atividades de transporte não devem ser negligenciadas, já que parâmetros como o tempo de transporte, tempo de retorno do transportador, número de transportadores e capacidade do transportador influenciam significativamente o resultado.

Çentikaya (2006) realizou um estudo visando obter o melhor tempo de atravessamento em um processo com duas máquinas e n tipos de produtos, considerando transporte unitário entre as máquinas por meio de um agente transportador, e setups independentes (que podem ser antecipados) e dependentes (que não podem ser antecipados). Propôs um algoritmo determinístico, que considera tempos diferentes para o transporte de peças da máquina 1 para a máquina 2, e de volta da máquina 2 para a máquina 1, que considera ainda que a primeira máquina fica bloqueada caso o agente transportador não esteja livre para retirar. Esse algoritmo encontra a solução ótima para os dois casos de setups.

Chiu et al. (2004) afirmaram que poucos são os estudos que visam a redução do tempo de atravessamento e que simultaneamente considerem as atividades de transporte, esta afirmação é encontrada no trabalho de Chang e Chiu (2005), que apresenta uma revisão da literatura com 67 trabalhos de Lot Streaming publicados entre 1976 e 2004. Os trabalhos foram

classificados entre aqueles que têm o objetivo do menor tempo de atravessamento e aqueles cujo objetivo é o menor custo total de produção. A figura 2 mostra que poucos destes trabalhos consideram as atividades de movimentação (CHANG; CHIU, 2005).

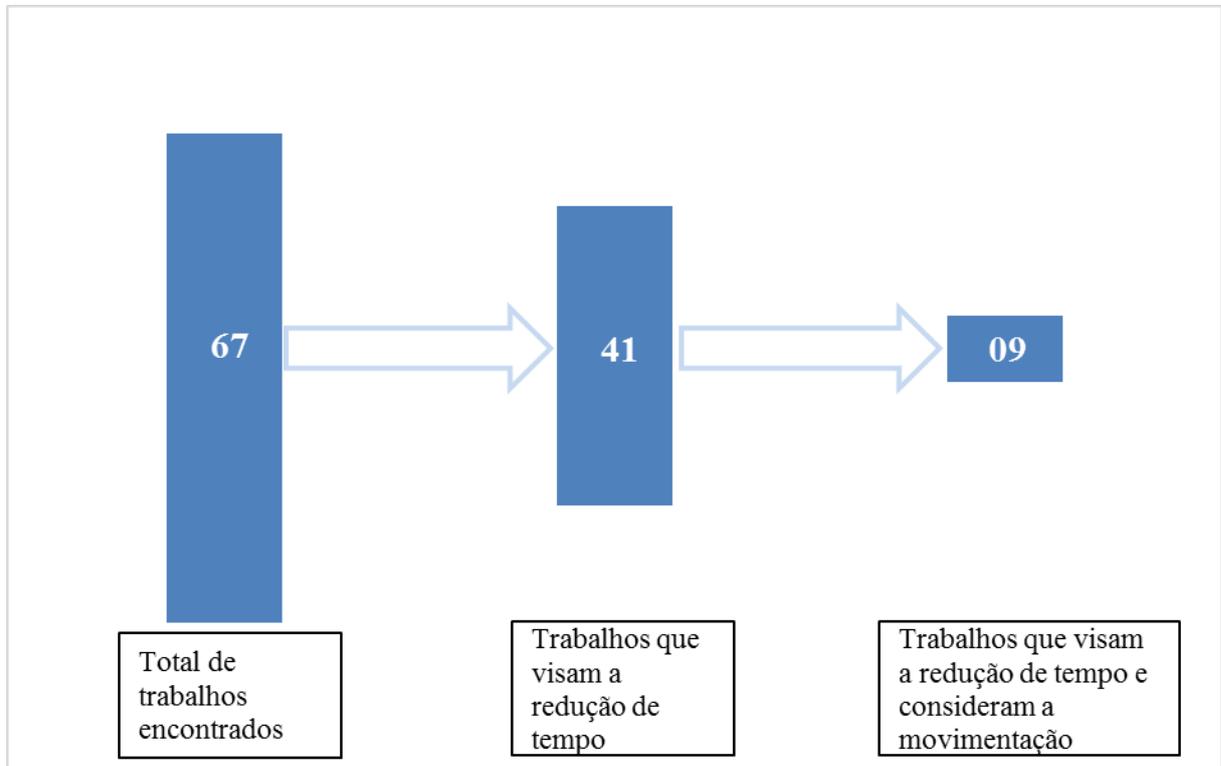


Figura 2 Número de trabalhos sobre LS que consideram a movimentação
 Fonte: Construído com base no trabalho de Chang e Chiu (2005)

Dentre os trabalhos encontrados por Chang e Chiu (2005) dois tratam a variabilidade nos tempos utilizados, e destes dois nenhum considera as atividades de movimentação. Chang e Chiu (2005) concluem seu trabalho apontando recomendações para trabalhos futuros dizendo, entre outras coisas, que estes deveriam considerar processos estocásticos e tempos de transporte.

Zagonel e Cleto (2007) estudaram o impacto da implantação do fluxo unitário de peças na capacidade, no tempo de atravessamento e nos estoques, em uma célula de usinagem hipotética. Foi feita uma simulação de um processo composto por 5 máquinas passíveis de quebras aleatórias, diversos produtos e um tempo de setup, e concluíram que

- a) Para reduzir o lote de transferência sem reduzir a capacidade da célula, foi preciso aumentar a capacidade da linha com a adição de outro operador;

- b) Quanto maiores eram os tempos de setup, pior era o desempenho do modelo, quando se reduzia os lotes de produção;
- c) Com lotes menores, o operador perdia muito tempo com setups, fazendo com que o equipamento gargalo ficasse bloqueado ou vazio, reduzindo a capacidade total da célula.

Edis et al. (2007) realizaram uma revisão da literatura dos trabalhos de Lot Streaming que consideravam atividades de transporte. Segundo os autores, incluir as atividades de transporte torna o problema mais real. Concluíram que existem poucos trabalhos que consideram os tempos de transporte, listando 13 trabalhos nestas condições. Os autores ressaltam que todos os 13 trabalhos que encontraram são determinísticos em todos os aspectos, mas que sistemas reais possuem comportamento estocástico e deveriam ser modelados de modo semelhante (EDIS et al., 2007).

Edis et al. (2007) mostraram ainda que existe uma dualidade nos trabalhos de LS, sendo que alguns trazem o transporte como fator de custo e outros como fator de tempo. Em sua maioria os trabalhos tratam as atividades de transporte como um fator de tempo, e a capacidade do agente e transporte ou o número de transportadores são usualmente infinitos (EDIS et al., 2007).

Yang e Shen (2011) mostraram que variabilidade do sistema deve ser levada em conta ao calcular as variáveis que irão controlar a produção. Ao estudar uma indústria fabricante de componentes para telas de cristal líquido, Yang e Shen (2011) perceberam que as atividades de transporte de materiais entre as operações eram críticas, já que as peças em questão eram frágeis e facilmente contamináveis, exigindo portanto um transporte cauteloso. Yang e Shen (2011) desenvolveram uma rede neural capaz de propor valores para serem alimentados em um modelo de simulação, e com isso calcular diariamente qual o melhor tamanho para o lote de transferência. As variáveis utilizadas no modelo de simulação eram alteradas diariamente, e com isso, a variabilidade das operações podia ser incorporada. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles obtidos em um método tradicional de cálculo de lotes de transferência, e foi mostrado que o cálculo dinâmico desenvolvido é superior ao tradicional. Segundo os autores, diversos trabalhos tratam o problema de dimensionamento de lote de transferência de maneira determinística mas, na prática, resultados determinísticos têm pouco valor (YANG, SHEN, 2011).

Sarin et al. (2011) desenvolveram um algoritmo para determinar sub-lotes inteiros, em um processo de montagem composto por duas etapas, de modo a minimizar o tempo de

atravessamento. A primeira etapa do processo era composta por m máquinas, que produziam peças que seriam montadas por uma máquina na segunda etapa do processo. Embora tenham encontrado um algoritmo capaz de resolver o problema em tempo hábil, por meio da Programação Linear, foram considerados apenas tempos determinísticos.

Mortezaei e Zulkifli (2013) afirmam que os problemas de sequenciamento e LS geralmente são resolvidos depois do planejamento da produção já ter sido feito. Este planejamento tem grandes chances de ser alterado e adaptado pontualmente para que as restrições fabris de LS e de sequenciamento possam ser contornadas. Em seu trabalho consideraram um cenário com parâmetros determinísticos e forneceram então um modelo matemático capaz de integrar planejamento da produção, LS e sequenciamento, que com certas restrições, fornece a solução ótima para o problema e com a garantia de que o planejamento não terá de ser adaptado de maneira arbitrária.

Nejati et al. (2014) utilizaram o LS para otimizar um flow-shop de modo que os trabalhos sejam completados de preferência no mesmo turno que iniciaram. O problema em questão tinha um elevado grau de complexidade e o software escolhido foi capaz de resolver apenas as versões mais simples do problema, para as versões mais complexas o tempo de processamento seria impraticável. Tais questões foram então resolvidas com algoritmos genéticos propostos (NEJATI et al., 2014). Embora os resultados obtidos tenham sido satisfatórios, nenhuma variabilidade foi considerada.

Kang et al. (2014) estudaram a determinação do tamanho de lote de produção em um sistema com múltiplos produtos sujeito a custos de backlog e capacidade de estoque restrita. Consideraram os tempos de processamento determinísticos e consideraram as chegadas de pedidos estocásticas e modeladas por uma distribuição markoviana. Como seu modelo de programação linear fornece valores contínuos, uma técnica de arredondamento foi proposta. Os autores mostraram que os sistemas de controle que não consideram os custos de backlog tem um desempenho muito inferior àqueles que o fazem, e concluem ainda que novas técnicas de arredondamento deveriam ser estudadas já que influenciam diretamente no resultado obtido.

2.2 Simulação computacional

Segundo Cox e Mize (1968), a simulação é a atividade de realizar experimentos com o modelo de um sistema. Arquitetos constroem maquetes de casas e prédios, tais maquetes são modelos e podem simular características gerais dos prédios para que variáveis como área

ocupada, distâncias e proporções sejam melhor percebidas e estudadas. Existem diversos tipos de simulações e dentre elas a simulação computacional.

A simulação computacional é um procedimento no qual experimentos são realizados em um modelo matemático computadorizado de um sistema físico (SWAIT; BEN-AKIVA, 1987). Dentre as diversas técnicas de simulação computacional, a simulação por eventos discretos, quando aplicada à manufatura, pode descrever o fluxo de materiais ao longo de uma linha de produção, a interação entre máquinas e pessoas, e também as lógicas de movimentação e processamento.

Quando a simulação é aplicada a sistemas cujo estado se altera em instantes definidos do tempo, ela é chamada de simulação de eventos discretos (BRITO; TEIXEIRA, 2001). Neste tipo de simulação as mudanças no sistema ocorrem em instantes bem definidos no tempo, os quais são chamados de eventos e são definidos como toda ocorrência capaz de alterar as variáveis e, conseqüentemente, o estado do sistema. Apesar deste tipo de simulação poder ser feito manualmente, um sistema relativamente simples exigiria a manipulação de um grande número de variáveis e necessitaria então o auxílio de um computador (LAW; KELTON, 1991).

2.2.1 Modelos estocásticos e modelos determinísticos

As variáveis consideradas em modelos de simulação podem ter valores fixos e serem chamadas determinísticas ou podem ter valores que variem em um intervalo específico e, de acordo com alguma regra ou distribuição, essas variáveis são ditas estocásticas (PORTUGAL, 2005). Quando um modelo de simulação faz uso apenas de variáveis determinísticas ele é dito modelo de simulação determinístico, assim como a presença de uma ou mais variáveis estocásticas torna o modelo estocástico (BRITO; TEIXEIRA, 2001)

As variáveis estocásticas são representadas com o uso de curvas de distribuição de probabilidades, de modo que as variáveis possam apresentar diversos valores dentro de um intervalo. Tais valores são sorteados sempre que necessários de modo que o pesquisador, ou o software, esteja sempre trabalhando com valores diferentes, mas que juntos representam a variabilidade do sistema em questão.

Os gráficos 5 e 6 apresentam respectivamente as distribuições de probabilidade da curva normal e da curva exponencial.

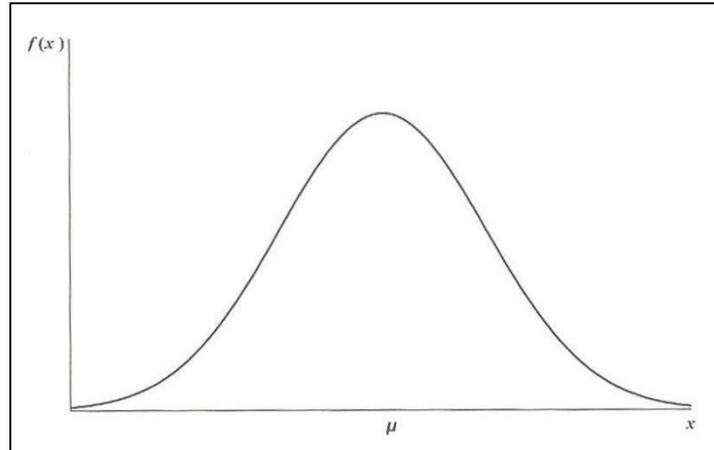


Gráfico 5 Distribuição normal
Fonte: Chwif e Medina, 2010

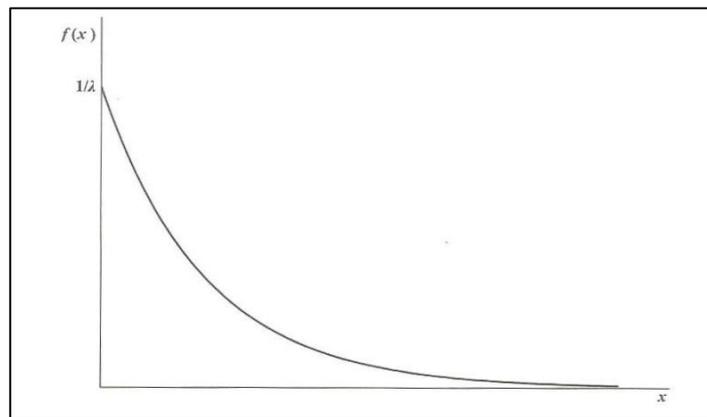


Gráfico 6 Distribuição exponencial
Fonte: Chwif e Medina, 2010

Segundo Chwif e Medina (2010), a distribuição normal é utilizada quando os valores têm igual probabilidade de estar acima ou abaixo da média. Já a distribuição exponencial modela situações com grande variabilidade e nas quais exista independência entre os valores.

2.2.2 Vantagens da simulação

Uma das grandes vantagens da simulação, segundo Harrel (2002), é que este estudo permite propor alterações sem interferir nas operações do sistema real. Chwif (1999) ressalta que diferente do que ocorre em sistemas reais, a experimentação em modelos de simulação não envolve riscos materiais ou humanos. Sistemas de segurança em veículos são testados em simulações, onde em um ambiente controlado as condições de um acidente são replicadas e

uma colisão é criada para que diversos fatores possam ser observados. Essa simulação, apesar de não apresentar riscos aos envolvidos, é muito onerosa, já que os componentes são destruídos a cada experimento. O problema do alto custo por experimento não é observado na simulação computacional, pois em um ambiente virtual diversos cenários podem ser estudados e comparados sem que nada se perca.

2.2.3 Softwares de simulação

Segundo Chwif e Medina (2010), um modelo computacional pode ser construído de três maneiras: com uso de linguagens de programação, com uso de linguagens de simulação ou com o uso de simuladores. Linguagens de programação de alto nível, como C, C++, Basic ou Pascal podem ser utilizadas na criação do modelo computacional, porém esta abordagem demanda mais tempo já que todas as funções, análises e tratamentos estatísticos deverão ser programados pelo analista. Para facilitar a construção dos modelos de simulação computacionais, na década de 1960 surgiu a primeira linguagem de programação dedicada à simulação, e a partir da década de 1980 surgiam os simuladores, softwares criados especificamente para a construção de modelos de simulação (CHWIF; MEDINA, 2010).

Chwif e Medina (2010) listam 5 características gerais que devem ser levadas em conta no momento da escolha do software a ser utilizado, são elas:

- a) Preço baixo;
- b) Fornecer o tipo de animação necessária (2D ou 3D);
- c) Poucos erros e problemas de construção;
- d) Software de companhia com reputação;
- e) Facilidade de uso.

Chwif e Medina (2010) dizem que o número de problemas e erros em um software geralmente se reduz conforme avançam as versões do programa. Para este trabalho o software escolhido foi a versão 11 do Tecnomatix Plant Simulation, que é produzido pela Siemens e que possui uma versão estudantil gratuita. Embora este trabalho não seja focado na animação da manufatura proposta, ele será simulado em duas e três dimensões, pois tal característica é nativa

do software escolhido. Considerando que os fabricantes do software fornecem amplo material para aprendizado, foram então atendidas as cinco recomendações propostas por Chwif e Medina (2010) para a escolha de um software de simulação.

2.2.4 Etapas para elaboração de um trabalho de simulação

Segundo Chwif e Medina (2010), para se construir um modelo de simulação bem sucedido é preciso formular o modelo, que consiste na criação do modelo conceitual e identificação dos dados de entrada; implementar o modelo, com a construção, verificação e validação do modelo computacional e por último analisar os resultados obtidos. Tais etapas são ilustradas na figura 9.

Segundo Chwif e Medina (2010), a metodologia da simulação, ilustrada na figura 3, começa com a definição de um problema, seguida das variáveis e dos parâmetros do sistema até a criação do modelo conceitual. O modelo de simulação computacional é criado com base no modelo conceitual e deve ser verificado e validado antes da análise dos resultados obtidos com a simulação.

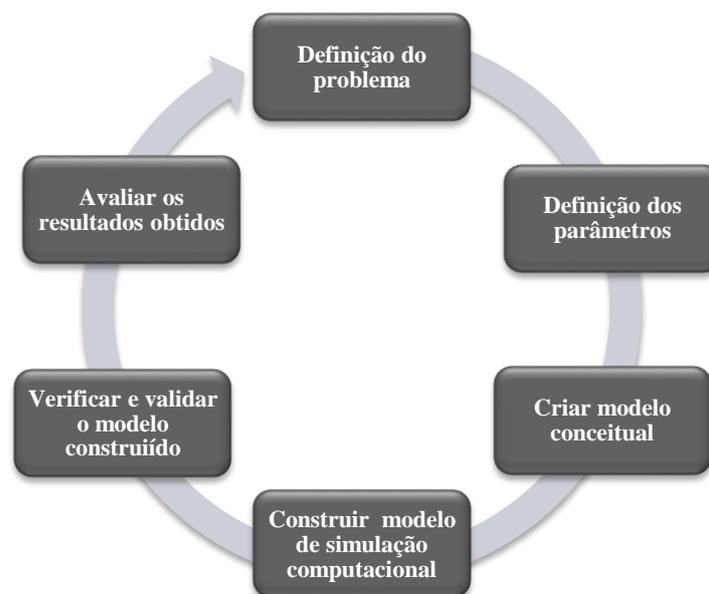


Figura 3 Metodologia da simulação
Fonte: Adaptado de Chwif e Medina (2010)

2.2.5 Aplicações da simulação na manufatura

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para comparar o desempenho de sistemas convencionais de manufatura e sistemas just-in-time. Cook (1994) realizou um estudo comparativo entre o sistema tradicional, o sistema just-in-time e Teoria das Restrições usando um modelo de simulação, composto por cinco estações de trabalho e diferentes cenários de variação de tempos de ciclo para cada um dos sistemas.

Chakravorty e Atwater (1995) também desenvolveram um estudo comparativo com uso de simulação computacional, entre um sistema tradicional de manufatura, com tempos de ciclo determinados, e um sistema just-in-time, com 20% de capacidade ociosa. Foram considerados vários níveis de estoque entre processos e variabilidade do sistema, descrita por tempo entre quebra de máquina e tempo entre manutenção. Concluíram que, diferente do que se podia esperar, quanto maior o estoque entre processos, melhor o desempenho da linha just-in-time.

Chakravorty e Atwater (1996) incrementam seu trabalho e adicionam a simulação de uma linha que opera com os princípios da teoria das restrições. Esta nova linha foi submetida às mesmas condições e cenários das linhas tradicional e just-in-time. Concluíram que a linha operando conforme a teoria das restrições apresenta melhores resultados que as demais quando a variabilidade do sistema é elevada.

Taylor (1999) usou um modelo de simulação, com layout fornecido por uma grande montadora, para comparar a performance financeira dos estoques entre um sistema de produção puxada, um sistema de produção empurrada e um sistema de produção híbrido.

Silva et al. (2007) mostraram que softwares de simulação podem ser um recurso didático importante e que alguns conceitos são compreendidos mais facilmente com o uso do software, uma vez que replica as situações comuns encontradas em ambientes fabris. Realizaram simulações para mostrar o efeito do gargalo e do dimensionamento do lote de transferência, do lote de fabricação e do balanceamento do fluxo.

Watson (2008) construiu um modelo de simulação para comparar a performance de um sistema just-in-time com outro baseado na teoria das restrições. Em seu trabalho foram utilizadas cinco estações de trabalho sujeitas a quebras não programadas.

Oliveira (2008) relaciona diversos trabalhos e mostra que a simulação computacional pode contribuir para a aplicação das técnicas do Sistema Toyota de produção. Lobo (1997) desenvolveu uma metodologia na qual o uso da simulação alinhada às técnicas de gerenciamento da produção consegue criar um ciclo de melhoria contínua.

Edis e Ornek (2009) utilizaram simulação computacional de eventos discretos, com o objetivo de determinar o número de sub-lotes iguais a ser usado e qual a melhor disciplina de fila a ser adotada, para obter o melhor desempenho segundo 5 indicadores diferentes, dentre eles o makespan. No sistema proposto, composto por 10 máquinas, foi considerado setup e a existência de um agente transportador capaz de carregar um único sub-lote por vez, independentemente do número de peças. Devido à complexidade do problema, diversas replicações do modelo de simulação foram feitas, corroborando para a conclusão de que a disciplina de fila a ser utilizada deve ser determinada de acordo com o indicador de performance escolhido (EDIS, ORNEK, 2009).

Cheraghi et al. (2011) utilizam a simulação para comparar diversos sistemas de produção e seus desempenhos, quando submetidos a diferentes tamanhos de lote, taxas de variação e políticas de manutenção dos equipamentos, e concluem que nenhum sistema de produção é melhor que outro em todas as situações testadas.

Com o intuito de melhorar a produtividade de uma pequena indústria, Neve (2011) construiu um modelo de simulação e verificou se a redução do tamanho dos lotes de produção para o lote unitário traria benefícios para a indústria em questão. Em seu trabalho Neve (2011) mostrou que, em determinadas condições, o desempenho do sistema era reduzido quando se utilizava o lote unitário.

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Considerando a metodologia de simulação proposta por Chwif e Medina (2010), este trabalho segue o roteiro de atividades apresentado na figura 4.

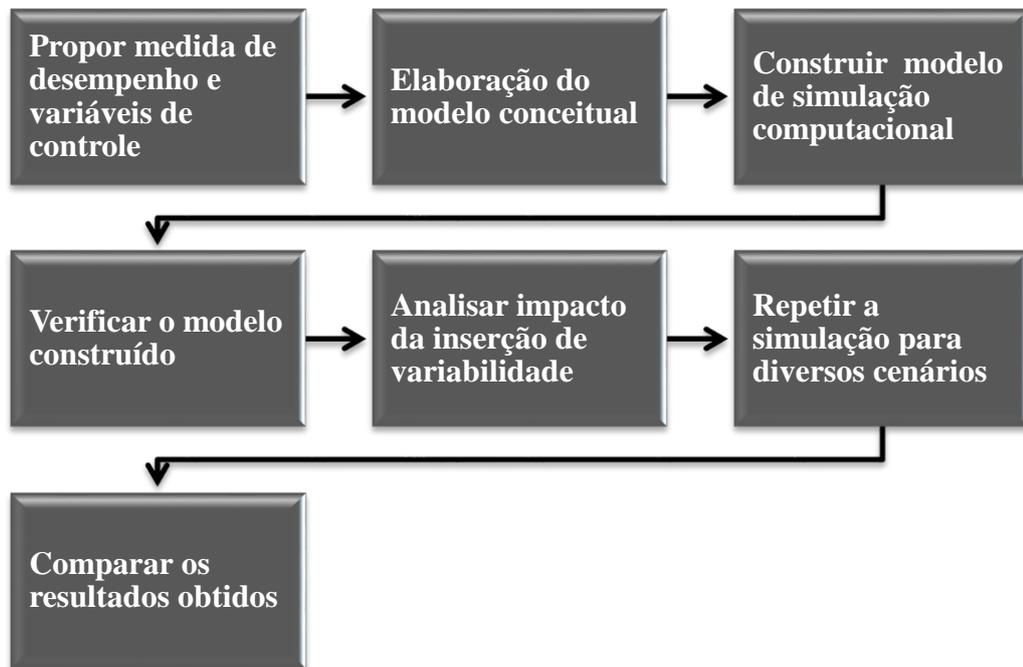


Figura 4 Roteiro de atividades para um trabalho de simulação
Fonte: Adaptado de Chwif e Medina (2010)

Para criar o modelo conceitual foram definidas as variáveis que influenciam diretamente o comportamento do sistema e os indicadores de desempenho do mesmo. Posteriormente, o modelo de simulação computacional foi construído com auxílio do software Plant Simulation.

Após a construção do modelo computacional, a lógica de funcionamento do mesmo foi verificada, garantindo que as movimentações, as sequências e as regras construídas no modelo são as mesmas propostas pelo modelo conceitual.

De posse de um modelo computacional verificado, tabelas e gráficos foram gerados para auxiliar na comparação entre os diversos cenários propostos, buscando evidenciar como a variação estocástica inserida no modelo afeta o número ideal de peças a serem transportadas de modo a obter o melhor desempenho segundo o indicador escolhido.

3.1 Definição dos parâmetros

A medida de desempenho considerada para que os diversos cenários pudessem ser comparados foi a produtividade média, medida em peças por hora. Esta variável se relaciona diretamente com o tempo total de atravessamento (makespan) de modo inversamente proporcional, uma vez que quanto menor o tempo total de atravessamento, maior será a quantidade de peças produzidas por hora. Os parâmetros a serem alterados são:

- a) Tempo médio de processamento da máquina 1;
- b) Tempo médio de processamento da máquina 2;
- c) Proporção da variabilidade do tempos em relação a média;
- d) Tempo para transportar peças da máquina 1 para a máquina 2 e retornar vazio para a máquina 1;
- e) Quantidade a ser transportada em cada viagem do transportador (lote de transferência).

3.2 Modelo conceitual

O modelo conceitual observado na figura 5 mostra os componentes do modelo estudado e também o fluxo de materiais pelo sistema. Tal modelo foi utilizado para a criação do modelo computacional.

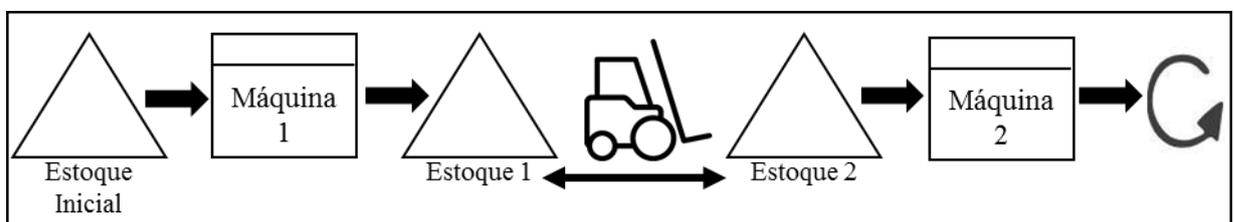


Figura 5 Modelo conceitual
Fonte: Autor

Na figura 5, a seta dupla entre os estoques 1 e 2 representa a função transporte e indica que o transportador deve ir do estoque 1 ao estoque 2 e então retornar vazio ao estoque 1.

Tal modelo pode ser classificado de acordo com a notação de Chang e Chiu (2005) como sendo do tipo $\{F_2, L_1, E, A, I, M_{\leftarrow(1)}^{\rightarrow}, C_{\max}\}$. A tabela 3 apresenta os sete parâmetros e seus significados.

Tabela 3 Classificação deste trabalho segundo Chang e Chiu

F_2	Sistema de produção do tipo Flow shop composto por duas máquinas
L_1	Um produto
E	Sub-lotes iguais
A	Sub-lotes de tamanho discreto (não fracionários)
I	Sub-lotes podem esperar entre as operações
$M_{\leftarrow(1)}^{\rightarrow}$	Um agente transportador sujeito a um tempo de ida e um tempo de volta
C_{\max}	Medição do desempenho feita pelo tempo total de atravessamento (makespan)

Fonte: Autor

Segundo Segura et al. (2012) este trabalho pode ser ainda classificado como sendo do tipo 2/1/E/II/DV/No-ST/TransT. A tabela 4 explica os sete parâmetros.

Tabela 4 Classificação deste trabalho segundo Segura et al.

2	Duas máquinas
1	Um produto
E	Sub-lotes iguais
II	Espera intermitente
DV	Sub-lotes discretos
No-ST	Não considera setup
TransT	Considera tempo de transporte

Fonte: Autor

3.3 Cenários considerados

Na impossibilidade de se trabalhar com as infinitas combinações de tempos e tamanhos de lotes, buscou-se a escolha de parâmetros que possam servir de base àqueles interessados em comparar a realidade de seus processos com os cenários apresentados neste trabalho. Além disso, os parâmetros escolhidos buscam explicitar o impacto da variabilidade dos tempos de processamento na determinação do tamanho do lote de transferência. Tais parâmetros são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 Parâmetros considerados para construção dos cenários

#	Tempos em minutos		
	Máquina 1	Máquina 2	Transporte
1	02:00	02:00	02:00
2	02:00	02:00	04:00
3	04:00	02:00	02:00
4	04:00	02:00	04:00
5	02:00	04:00	02:00
6	02:00	04:00	04:00

Fonte: Autor

Na condição número 1 (#1) todos os tempos são iguais, representando uma situação balanceada, em #2 o transporte passa a ser a restrição do sistema, em #3 a máquina 1 é a restrição, em #4 tanto a máquina 1 quanto o transporte possuem os maiores tempos, em #5 a máquina 2 passa a ser a restrição e em #6 tanto a máquina 2 quanto o transporte são restrição.

Estes seis parâmetros foram considerados em 4 situações diferentes, de modo a representar diferentes variabilidades presentes no sistema. No primeiro caso, os 6 parâmetros são tratados em um ambiente de tempos determinísticos, e como resultado temos cenários que servem como base de comparação aos demais. No segundo caso, os 6 parâmetros para os tempos de processamento das máquinas são considerados como sendo o parâmetro λ de uma distribuição exponencial. O terceiro caso representa a variabilidade dos tempos com uma curva normal onde os 6 parâmetros para os tempos de processamento representam a média (μ), e o desvio padrão é igual a 15% do valor da média, ou seja, $\sigma = 15\% * \mu$. O quarto e último caso é semelhante ao terceiro, porém os valores para o desvio padrão são iguais a 30% da média, ou seja, $\sigma = 30\% * \mu$.

Em todas as 24 situações apresentadas o tamanho do lote de transferência variou de 1 a 10, de modo que se pode observar qual o melhor tamanho de lote para a situação em questão. Ao todo 240 cenários foram criados e estão relacionados na tabela 6.

Tabela 6 Cenários considerados

	Tempo Máquina 1 (minutos)	Tempo Máquina 2 (minutos)	Tempo de Transporte (minutos)	Lote de transferência (unidades)
Tempos determinísticos	2	2	2	de 1 a 10 unidades
	2	2	4	
	4	2	2	
	4	2	4	
	2	4	2	
	2	4	4	
Tempos modelados com distribuição exponencial	$\lambda = 2$	$\lambda = 2$	2	de 1 a 10 unidades
	$\lambda = 2$	$\lambda = 2$	4	
	$\lambda = 4$	$\lambda = 2$	2	
	$\lambda = 4$	$\lambda = 2$	4	
	$\lambda = 2$	$\lambda = 4$	2	
	$\lambda = 2$	$\lambda = 4$	4	
Tempos modelados com distribuição normal de baixa variabilidade	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	2	de 1 a 10 unidades
	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	4	
	$\mu = 4 ; \sigma = 15\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	2	
	$\mu = 4 ; \sigma = 15\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	4	
	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	$\mu = 4 ; \sigma = 15\% * \mu$	2	
	$\mu = 2 ; \sigma = 15\% * \mu$	$\mu = 4 ; \sigma = 15\% * \mu$	4	
Tempos modelados com distribuição normal de alta variabilidade	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	2	de 1 a 10 unidades
	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	4	
	$\mu = 4 ; \sigma = 30\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	2	
	$\mu = 4 ; \sigma = 30\% * \mu$	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	4	
	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	$\mu = 4 ; \sigma = 30\% * \mu$	2	
	$\mu = 2 ; \sigma = 30\% * \mu$	$\mu = 4 ; \sigma = 30\% * \mu$	4	

Fonte: Autor

A utilização de tempos determinísticos busca representar fábricas com elevado grau de automação, onde a variabilidade dos tempos é próxima de zero. As distribuições normais com alta e baixa variabilidade representam fábricas com operações manuais e automatizadas em níveis diferentes. A distribuição exponencial representa fábricas com processos manuais e grande dispersão entre os tempos de operação.

Embora a variabilidade do tempo de transporte não seja considerada, este trabalho atende as recomendações citadas por Chang e Chiu (2005), uma vez que considera as atividades

de movimentação e também processos estocásticos, pois a variabilidade dos tempos de processamento foi modelada. Este trabalho também incorpora as sugestões apontadas por Edis et al. (2007), pois considera o comportamento estocástico dos tempos de produção, e foi modelado de modo a incluir a variabilidade presentes em sistemas reais.

3.4 Verificação do modelo

Após a construção de um modelo de simulação computacional, implementado com auxílio do software Plant Simulation v11.1 e ilustrado no apêndice, o mesmo precisa ser verificado, ou seja, seu funcionamento precisa ser testado para que se possa garantir que a lógica concebida está de fato sendo representada. No caso do modelo utilizado neste trabalho foi preciso verificar, entre outros, se o agente transportador estava carregando a quantidade estipulada de peças, e se estava executando o trajeto no tempo e da maneira estipulada.

Além da verificação por observação detalhada feita evento a evento, pôde-se verificar o modelo comparando os resultados obtidos nos cenários determinísticos com os valores obtidos por meio do cálculo exato dos resultados. Por exemplo, para o cenário determinístico com tempos de processamento e de transporte iguais a dois minutos, a produção deve ser de 30 peças por hora, para qualquer tamanho de lote de transferência. Tal resultado foi de fato obtido conforme mostra o gráfico 7 construído com base em valores fornecidos pelo modelo. A notação utilizada no título do gráfico 7 é utilizada em demais gráficos e significa: M1 – Tempo de processamento da máquina 1, M2 – Tempo de processamento da máquina 2, T – tempo de transporte.

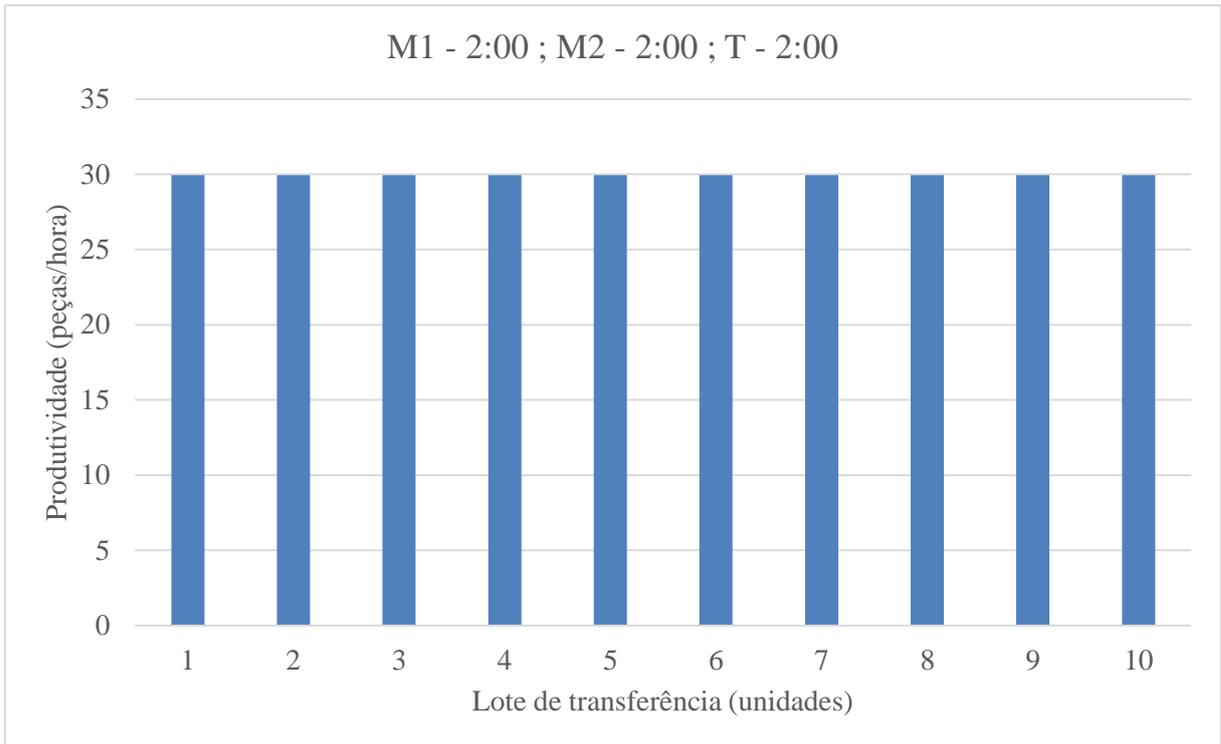


Gráfico 7 Relação entre o tamanho do lote de transferência e a produtividade para o cenário determinístico com M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 2:00

Fonte: Autor

Para o cenário com tempos determinísticos e com os parâmetros: M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00, a produtividade máxima de 30 peças por hora só pode ser atingida se for utilizado um lote de transferência de, no mínimo, 2 unidades. Tal resultado também foi obtido com o modelo de simulação construído, conforme mostra o gráfico 8.

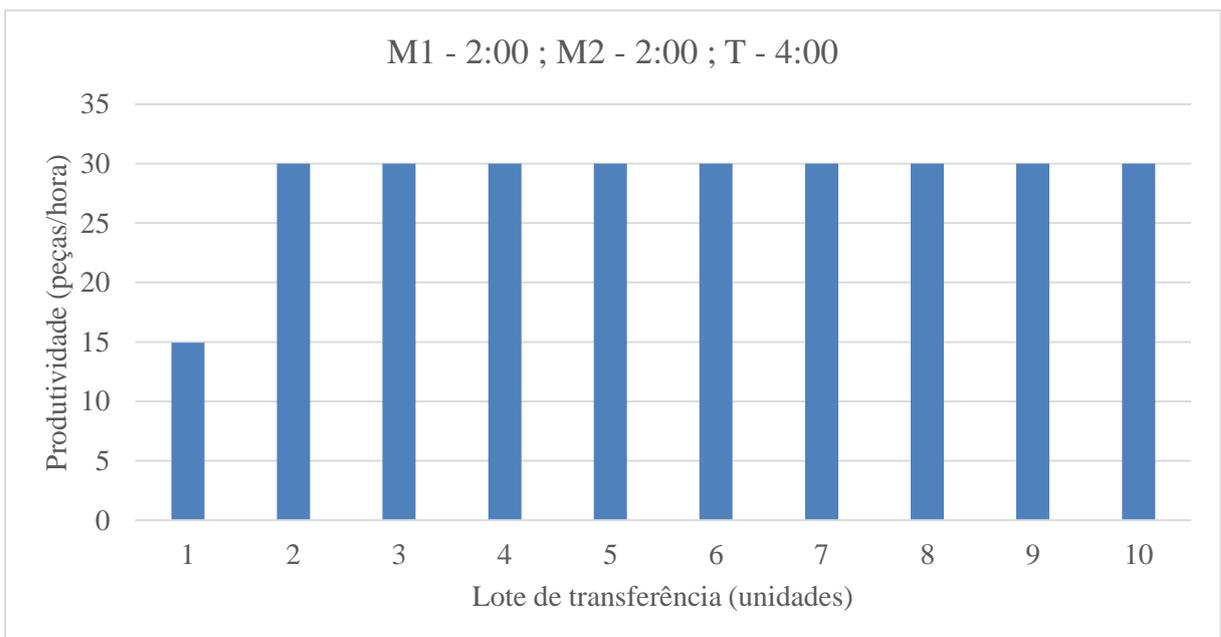


Gráfico 8 Relação entre o tamanho do lote de transferência e a produtividade para o cenário determinístico com M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00

Fonte: Autor

Os gráficos 7 e 8, e também a observação evento a evento do funcionamento do modelo mostram que o mesmo representa o sistema proposto.

3.5 Coleta de resultados

Nos cenários em que a variabilidade está presente nos tempos de processamento, a coleta dos dados deve ser feita de modo a considerar o tempo de aquecimento do modelo. Nestes cenários também deve ser observado o número de replicações necessárias para garantir um intervalo de confiança adequado, de modo que os resultados possam ser devidamente comparados. A coleta dos resultados para estes cenários foi feita individualmente e é apresentada a seguir.

3.5.1 Normal com baixa variabilidade

Para coletar os resultados dos cenários que modelam o tempo de processamento das máquinas com uma curva normal de baixa variabilidade, foi traçada a curva de aquecimento do modelo com os parâmetros M1:2 ; M2:2 ; T:4 e uma quantidade de 10 peças no lote de transferência. A curva de aquecimento obtida é representada no gráfico 9.

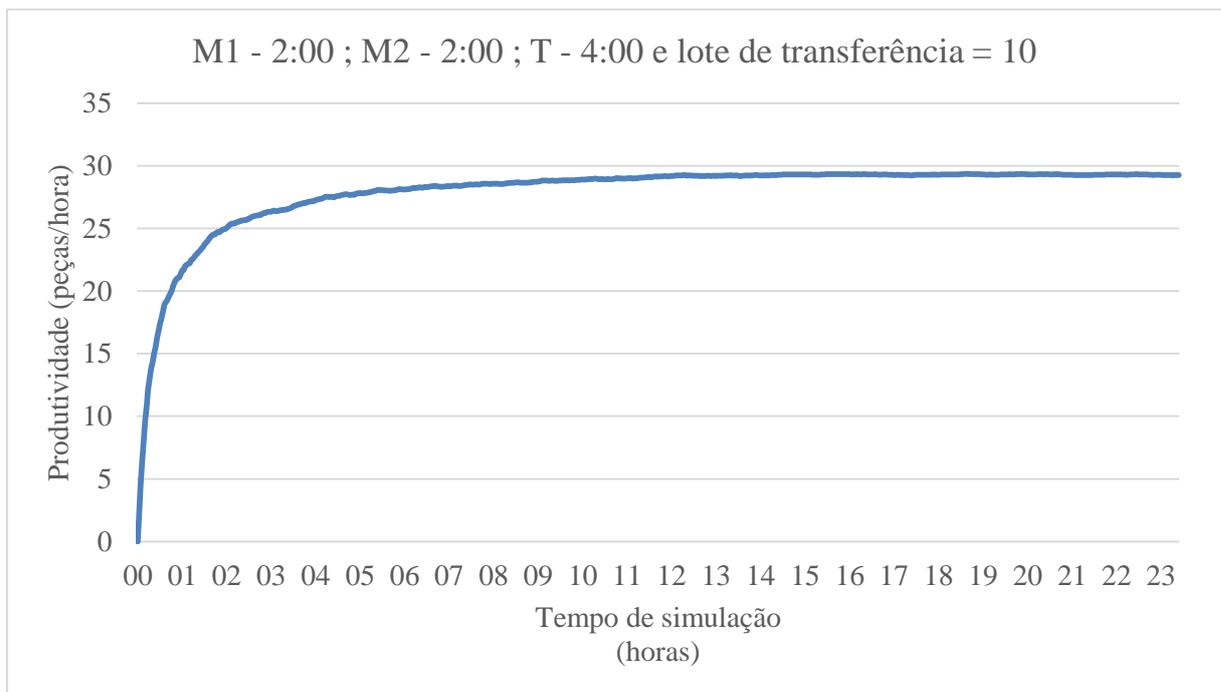


Gráfico 9 Curva de aquecimento para o cenário com os parâmetros M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00, Distribuição normal com baixa variabilidade e lote de transferência igual a 10 unidades.

Fonte: Autor

No gráfico 9 é possível perceber que o modelo se estabiliza após 12 horas do início da simulação, mas como medida de segurança considerou-se o tempo de aquecimento do modelo como sendo de 16h. O modelo de simulação construído foi então programado para descartar os resultados obtidos nas 16 primeiras horas, e coletar apenas os valores das 8 horas seguintes.

Os 60 cenários que utilizam a curva normal de baixa variabilidade foram simulados com 20 replicações cada, dentre estes cenários selecionou-se aquele que apresentou o maior desvio padrão, calculado com o resultado das 20 replicações, tal valor ($s = 0,387$ peças/hora) foi utilizado para calcular a precisão e intervalo de confiança para a média dos resultados. O cálculo da precisão (h) pode ser feito com uso da fórmula:

$$h = t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Sendo

$n = 20$ (número de replicações realizadas)

$s = 0,387$ (maior desvio padrão encontrado)

$\alpha = 0,05$ (nível de confiança desejada)

Portanto

$$h = t_{(20-1, \frac{0,05}{2})} * \frac{0,387}{\sqrt{20}} \quad (2)$$

$$h = t_{(19, 0,025)} * \frac{0,387}{4,472} \quad (3)$$

O valor de $t_{(19, 0,025)}$ pode ser consultado em uma tabela de valores críticos para a distribuição t de Student e tem o seu valor igual a 2,093, portanto:

$$h = 2,093 * \frac{0,387}{4,472} \quad (4)$$

$$h = 0,181 \quad (5)$$

Tal resultado garante, com 95% de confiança, que a média dos valores de produtividade obtidos com a simulação varia entre mais ou menos 0,181. Para realizar as comparações entre os diversos cenários busca-se uma precisão menor que 0,1 e para isso é necessário aumentar o

número de replicações. O cálculo do número de replicações necessárias para conseguir a precisão desejada pode ser feito com a fórmula:

$$n^* = \left[n * \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Sendo

$$n = 20 \text{ (número de replicações já realizadas)}$$

$$h = 0,181 \text{ (precisão inicial)}$$

$$h^* = 0,09 \text{ (precisão desejada)}$$

Portanto:

$$n^* = \left[20 * \left(\frac{0,181}{0,09} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$n^* = [20 * (2,011)^2] \quad (8)$$

$$n^* = [80,882] \quad (9)$$

$$n^* = 81 \quad (10)$$

Para garantir a precisão de 0,09 foi necessário replicar o modelo 81 vezes, como já haviam 20 replicações, outras 61 replicações foram realizadas. Novamente selecionou-se o maior desvio padrão encontrado ($s = 0,318$) e o cálculo da precisão foi efetuado.

$$h = t_{(81-1, \frac{0,05}{2})} * \frac{0,318}{\sqrt{81}} \quad (11)$$

$$h = t_{(80, 0,025)} * \frac{0,318}{9} \quad (12)$$

$$h = 1,990 * \frac{0,318}{9} \quad (13)$$

$$h = 0,070 \quad (14)$$

Dentre os 60 cenários avaliados, calcular a precisão para aquele com o maior desvio padrão observado garante que os outros 59 cenários têm uma precisão no mínimo igual a precisão calculada ($h = 0,070$). Sendo assim, os resultados dos 60 cenários nos quais a variabilidade é representada por uma curva normal de baixa variabilidade podem ser utilizados na comparação com os demais cenários.

3.5.2 Normal com alta variabilidade

A coleta dos dados para os cenários nos quais a variabilidade dos tempo foi modelada com uma curva normal de alta variabilidade foi feita de modo semelhante à exposta anteriormente. Primeiro foi observada a curva de estabilização do modelo para que o tempo de aquecimento pudesse ser determinado. O gráfico 10 apresenta a curva de estabilização para o cenário com os parâmetros M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00 e lote de transferência de 10 unidades.

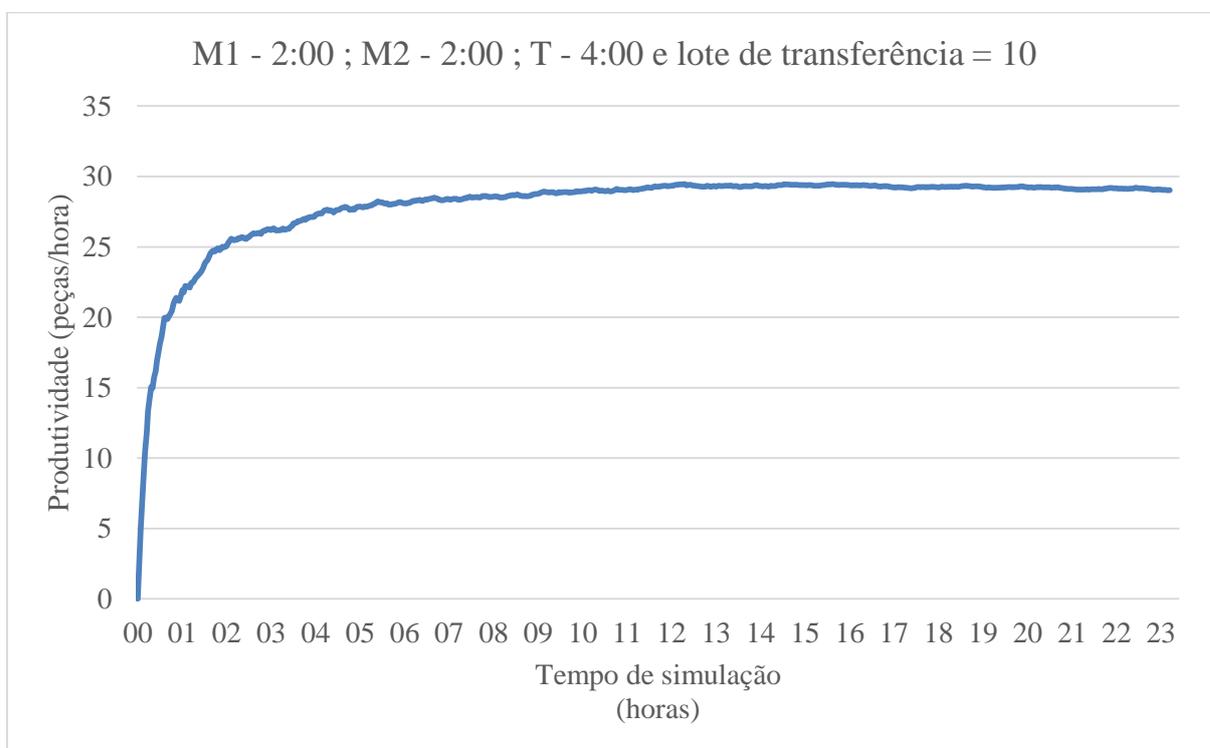


Gráfico 10 Curva de aquecimento para o cenário com os parâmetros M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00, Distribuição normal com alta variabilidade e lote de transferência igual a 10 unidades
Fonte: Autor

No gráfico 10 é possível observar que após 16h o modelo já atingiu o estado de estabilização e a partir deste tempo os dados foram coletados.

Como era esperado que estes cenários apresentassem uma variabilidade maior que os anteriores, iniciou-se a coleta dos dados com 81 replicações, e o maior valor observado para o desvio padrão foi de $s = 0,619$, e a precisão calculada (h) é portanto:

$$h = t_{(81-1, \frac{0,05}{2})} * \frac{0,619}{\sqrt{81}} \quad (15)$$

$$h = 0,137 \quad (16)$$

O número de replicações necessárias para se obter uma precisão $h = 0,09$ é:

$$n^* = \left\lceil 81 * \left(\frac{0,137}{0,09} \right)^2 \right\rceil \quad (17)$$

$$n^* = 188 \quad (18)$$

As 107 replicações adicionais necessárias foram realizadas e o maior desvio padrão observado foi $s = 0,575$ e novo cálculo de h é:

$$h = t_{(188-1, \frac{0,05}{2})} * \frac{0,575}{\sqrt{181}} \quad (19)$$

$$h = 0,083 \quad (20)$$

Como a precisão obtida é maior que a desejada, os dados dos cenários nos quais a variabilidade é representada por uma distribuição normal de alta variabilidade podem ser comparados com os resultados obtidos nos demais cenários.

3.5.3 Exponencial

A coleta dos dados para os cenários nos quais a variabilidade dos tempo foi modelada com uma curva exponencial foi feita da mesma maneira que as anteriores, e o gráfico 11 apresenta a curva de aquecimento obtida.

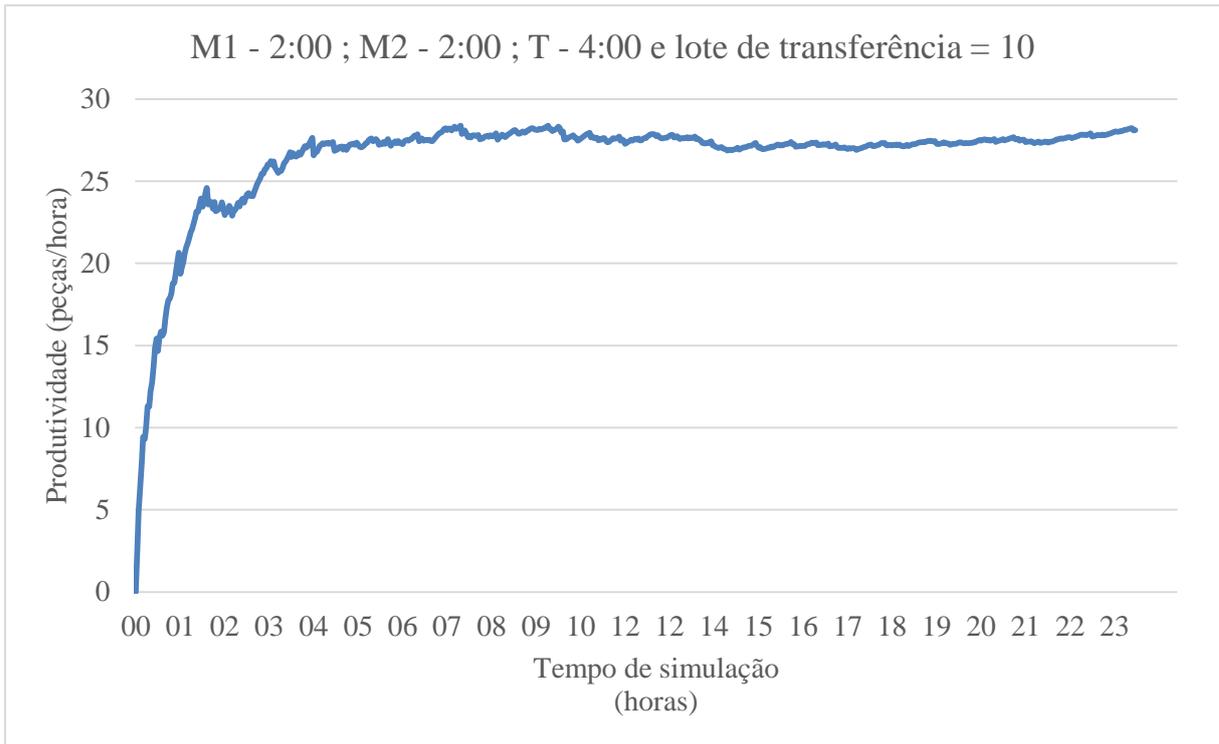


Gráfico 11 Curva de aquecimento para o cenário com os parâmetros M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00, Distribuição exponencial e lote de transferência igual a 10 unidades

Fonte: Autor

Embora a curva aparente uma variabilidade mais acentuada que as anteriores, com um período de simulação de 16h o modelo atinge o ponto de estabilização. Os 60 cenários foram então simulados com 188 replicações e o maior desvio padrão observado foi $s = 1,504$, e a precisão calculada (h) é então:

$$h = t_{(188-1, \frac{0,05}{2})} * \frac{1,504}{\sqrt{188}} \quad (21)$$

$$h = 0,216 \quad (22)$$

O número de replicações necessárias para se obter uma precisão $h = 0,09$ é:

$$n^* = \left\lceil 188 * \left(\frac{0,216}{0,09} \right)^2 \right\rceil \quad (23)$$

$$n^* = 1087 \quad (24)$$

As 899 replicações adicionais necessárias foram realizadas e o maior desvio padrão observado foi $s = 1,506$ e novo cálculo de h é:

$$h = t_{(1087-1, \frac{0,05}{2})} * \frac{1,506}{\sqrt{1087}} \quad (25)$$

$$h = 0,090 \quad (26)$$

A precisão obtida é igual a precisão desejada, logo os dados dos cenários com tempos de processamento modelados com uma curva exponencial podem ser comparados com os resultados obtidos nos demais cenários.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os gráficos 12 a 17 mostram qual o tamanho mínimo de lote de transferência necessário para que o sistema atinja o máximo valor para a produtividade média.

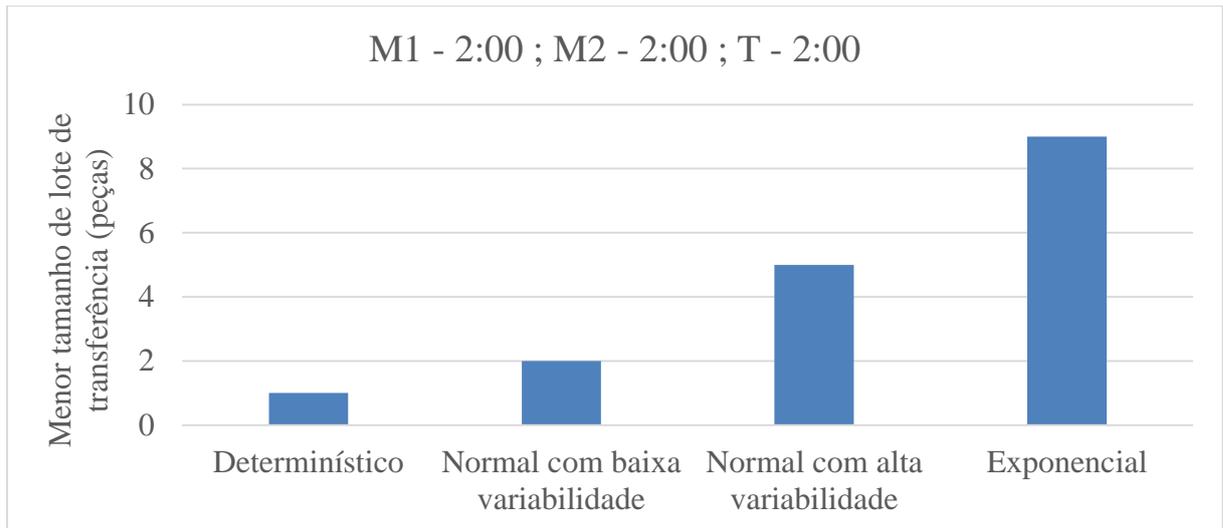


Gráfico 12 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 2:00 ; T – 2:00
Fonte: Autor

O gráfico 12 mostra que, em um sistema balanceado, o aumento da variabilidade faz com que seja necessário o aumento do tamanho do lote de transferência.

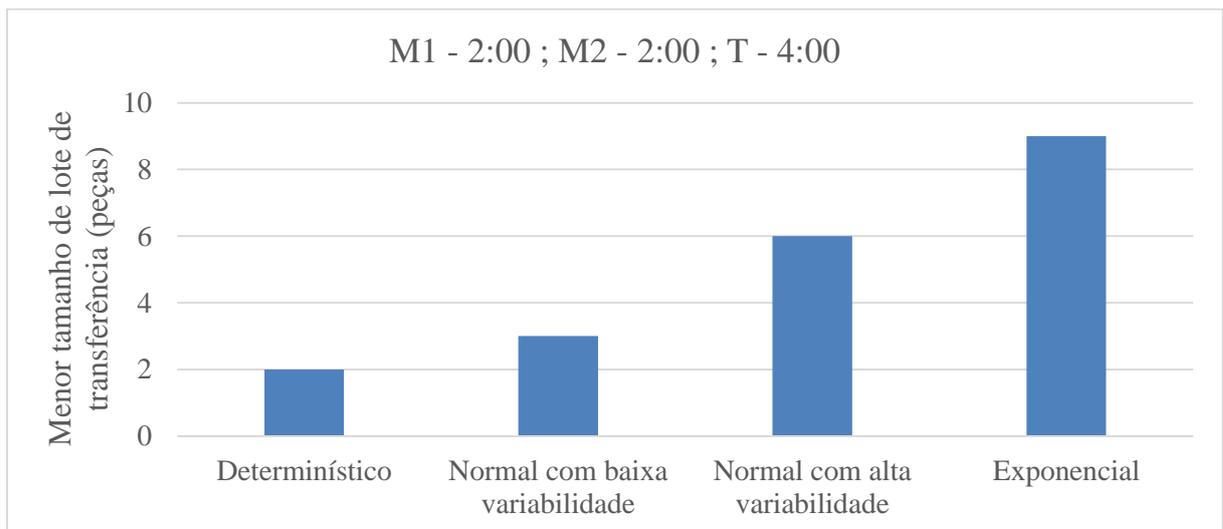


Gráfico 13 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 4:00 ; T – 2:00
Fonte: Autor

No gráfico 13 é possível observar que o efeito se repete. Mesmo quando o transporte tem um tempo maior que as demais operações, o aumento do tamanho do lote de transferência se faz necessário conforme aumenta a variabilidade.

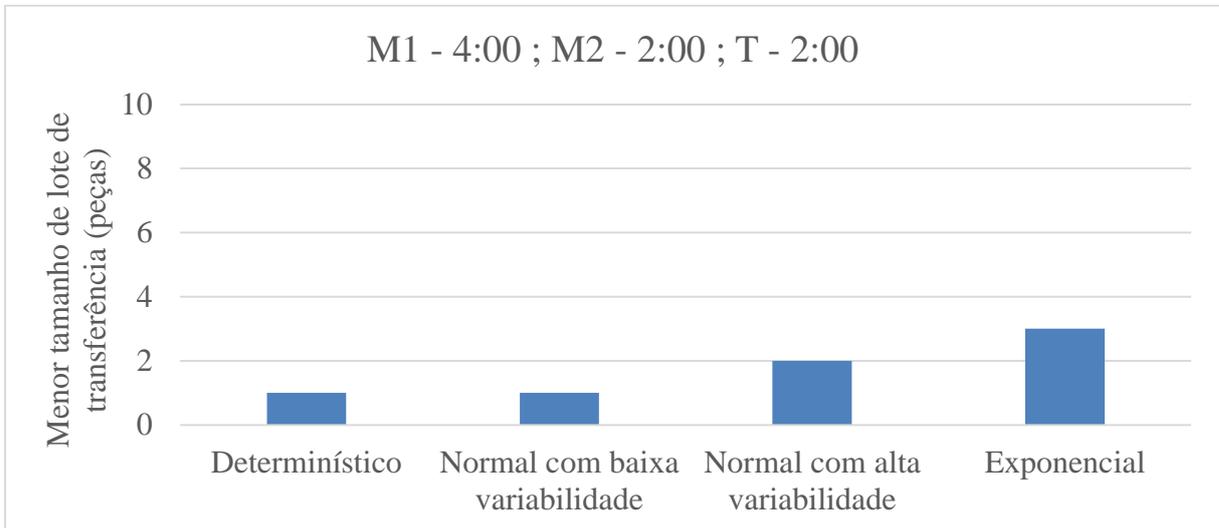


Gráfico 14 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 4:00 ; M2 – 2:00 ; T – 2:00
Fonte: Autor

No gráfico 14, que representa um cenário no qual a máquina 1 é a restrição, o aumento da variabilidade causa menor impacto no aumento do lote de transferência, quando comparado com cenários nos quais os tempos de máquina são equilibrados.

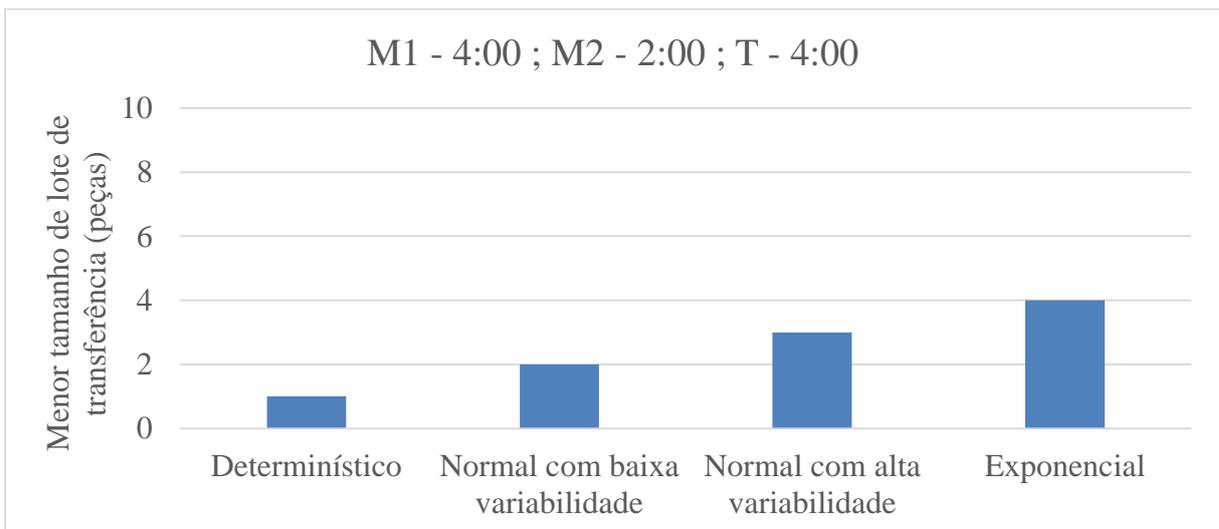


Gráfico 15 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 4:00 ; M2 – 2:00 ; T – 4:00
Fonte: Autor

No gráfico 15, tanto a máquina 1 quanto o transporte tem os maiores tempos, com isso o aumento da variabilidade faz com que o lote de transferência tenha de ser até quatro vezes maior do que em um cenário sem variabilidade (determinístico).

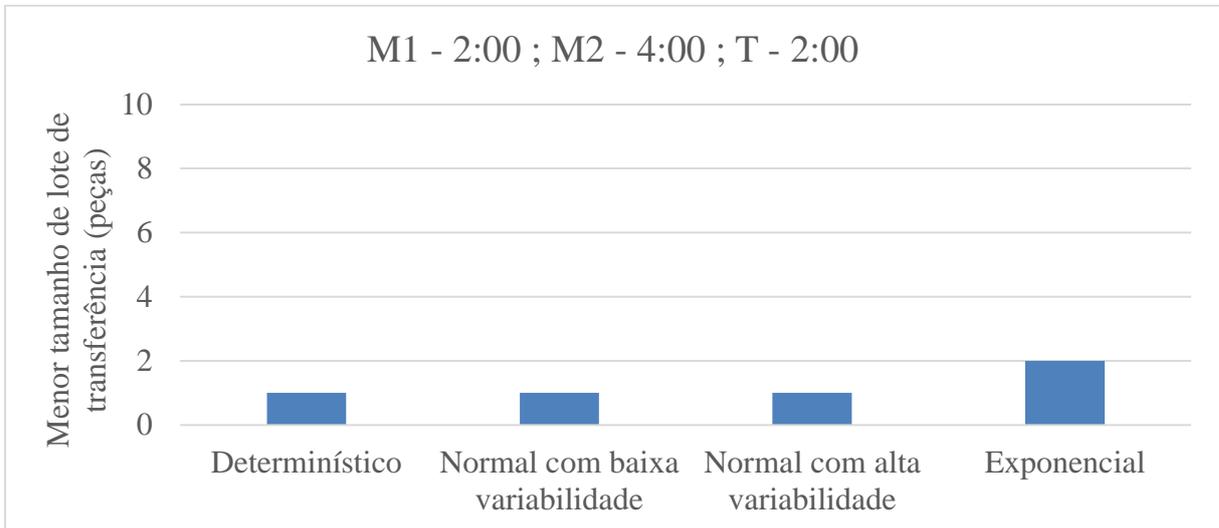


Gráfico 16 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 4:00 ; T – 2:00
Fonte: Autor

O gráfico 16 retrata o cenário no qual a máquina 2 é a restrição do sistema. Neste caso, a variabilidade tem pouco efeito no dimensionamento do lote de transferência.

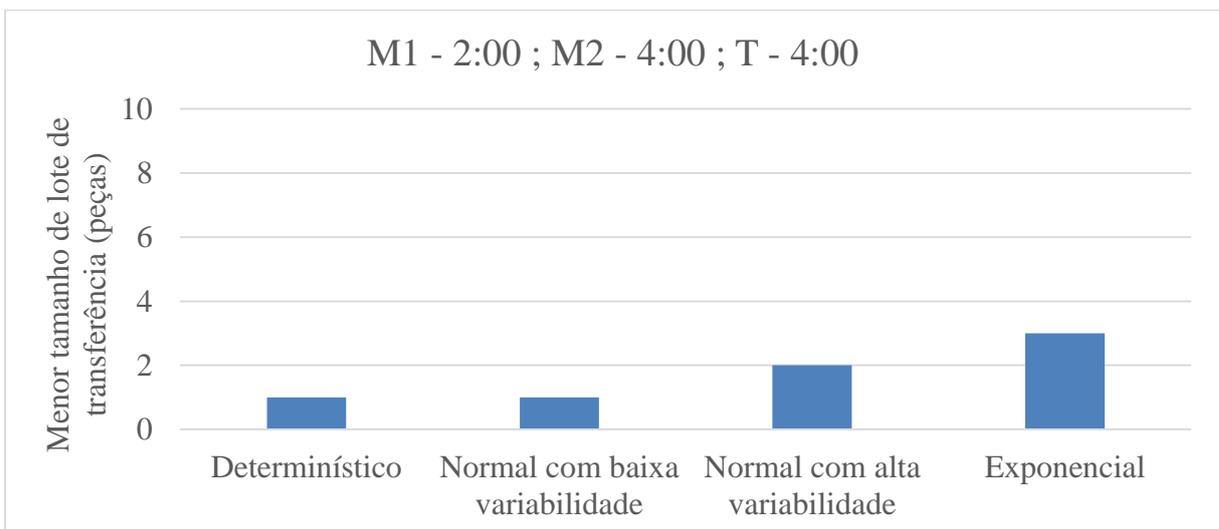


Gráfico 17 Comparação entre os menores tamanhos de lote com: M1 – 2:00 ; M2 – 4:00 ; T – 4:00
Fonte: Autor

No gráfico 17 a máquina 1 tem um tempo de ciclo menor que a máquina 2 e que o transporte, neste caso pouca variabilidade não afeta o dimensionamento do lote de transferência.

5 CONCLUSÕES

É possível concluir que, para os cenários estudados, o aumento da variabilidade no sistema influenciou diretamente o crescimento do tamanho do lote de transferência mínimo para que o sistema obtivesse o melhor desempenho. É possível perceber que em sistemas balanceados, onde os tempos das operações são semelhantes, o efeito da variabilidade no dimensionamento do lote de transferência ocorre de maneira linear, ou seja, em processos de manufatura representados por distribuições de maior dispersão é necessário utilizar maiores lotes de transferência.

Nos cenários estudados os lotes de transferência ideal encontrados se alteram quando se altera o tipo da distribuição estatística utilizada para representar o sistema, ou seja, alterar o nível de variabilidade presente no sistema altera também o dimensionamento do lote. Conclui-se que a organização do sistema de manufatura, responsável por introduzir mais ou menos variabilidade no sistema, tem influência no dimensionamento do lote de transferência.

Nota-se que entre as distribuições estatísticas utilizadas, aquela de maior dispersão (distribuição exponencial) afetou com mais intensidade o cenário no qual o gargalo do sistema está antes da atividade de transporte, portanto a posição das atividades com maior tempo de processamento em relação a atividade de transporte tem influência sobre o quanto varia o tamanho do lote de transferência. Nota-se que o aumento no tempo de transporte, quando os demais parâmetros são mantidos constantes, tem pouco efeito sobre a variação no tamanho do lote de transferência.

Pôde-se perceber que o lote unitário é uma referência teórica e que não considera fatores que influenciam a escolha do tamanho do lote de transferência entre dois postos de trabalho, como por exemplo a variabilidade do sistema. Assim é recomendável que estes fatores sejam considerados no dimensionamento do lote de transferência.

Recomenda-se para trabalhos futuros que considerem e analisem os efeitos da variabilidade em sistemas mais complexos, com a presença de mais do que duas máquinas, e diferentes tipos de produtos. A atividade de transporte considerada neste trabalho representa apenas uma das diversas variantes que compõe um problema de Lot Streaming, recomenda-se também analisar o impacto da variabilidade nas demais variações do problema, em cenários que poderiam incluir, por exemplo, a presença de atividades de setup, tempos de quebra de equipamentos, manutenção, entre outros.

REFERÊNCIAS

APPOLINÁRIO, Fábio. **Metodologia da ciência: filosofia e prática da pesquisa**. São Paulo: Thompson, 2006.

BAKER, Kenneth R. Lot streaming in the two-machine flow shop with setup times. **Annals of Operations Research**. [S.l.] v.57 n.1, p. 1-11, 1995.

BRITO, António C.; TEIXEIRA, José M. F. **Simulação por Computador: fundamentos e implementação de código em C e C++**. 1. ed. Porto: Publindústria, 2001.

ÇETINKAYA, Ferda C. Unit sized transfer batch scheduling in an automated two-machine flow-line cell with one transport agent. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Londres, v. 29, n. 1-2, p. 178-183, 2006.

CHAKRAVORTY, Satya S.; ATWATER, J. Brian. A comparative study of line design approaches for serial production systems. **International Journal of Operations & Production Management**. [S.l.] v. 16, n. 6, p. 91-108, 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/01443579610119117>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

CHAKRAVORTY, Satya S.; ATWATER, J. Brian. Do JIT lines perform better than traditionally balanced lines?. **International Journal of Operations & Production Management**. [S.l.] v. 15, n. 2, p. 77-88, 1995. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/01443579510080436>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

CHANG, Jen-Huei; CHIU, Huan-Neng. A comprehensive review of lot streaming. **International Journal of Production Research**. v. 43, n. 8, p. 1515-1536, 2005.

CHECOLI, Paulo F.; MONTEIRO, Angelise V. A Teoria das restrições como recurso para a excelência da gestão da manufatura. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 20, 2000.

CHEN, Jiang; STEINER, George. **Approximation methods for discrete lot streaming in flow shops**. *Operations Research Letters*, [S.l.] v. 21, n. 3, p. 139-145, 1997. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6377\(97\)00039-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6377(97)00039-4)>. Acesso em: 17 jan. 2015.

CHEN, Jiang; STEINER, George. **Discrete lot streaming in two-machine flow shops**. DeGroote School of Business Working Paper. Paper 44. 1995

CHERAGHI, S. Hossein; DADASHZADEH, Mohammad; SOPPIN, Mahesh. Comparative analysis of production control systems through simulation. **Journal of Business & Economics Research**. [S.l.] v. 6, n. 5, 2011. Disponível em: <<http://www.cluteinstitute.com/ojs/index.php/JBER/article/view/2421/2468>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

CHIU, Huan-Neng; CHANG, Jen-Huei; LEE, Chia-Hsin. Lot streaming models with a limited number of capacitated transporters in multistage batch production systems. **Computers e Operations Research**. [S.l.] v. 31, n. 12, p. 2003-2020, 2004. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(03\)00159-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00159-X)>. Acesso em: 17 jan. 2015.

CHWIF, Leonardo. MEDINA, Afonso C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 3. ed. São Paulo: Ed do Autor, 2010.

_____, Leonardo. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. 1999. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

COOK, David P. A simulation comparison of traditional, JIT, and TOC manufacturing systems in a flow shop with bottlenecks. **Production and Inventory Management Journal**. [S.l.] v. 35, p. 73-73, 1994.

COX, J. H.; MIZE, Joe H. **Essentials of simulation**. Prentice-Hall International series in industrial engineering and management science, 1968.

EDIS, Rahime S.; ORNEK, Arslan M. Simulation analysis of lot streaming in job shops with transportation queue disciplines. **Simulation Modelling Practice and Theory**. [S.l.] v. 17, n. 2, p. 442-453, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2008.10.002>>. Acesso em: 17 jan. 2015.

_____, Rahime S.; ORNEK, Arslan M.; ELIIYI, Deniz T. **A REVIEW ON LOT STREAMING PROBLEMS WITH TRANSPORTATION ACTIVITIES**. Revista da Universidade de Ciência e Tecnologia do comércio de Istambul. 11. ed. p.129-142, 2007

GENOVA, Krasimira; GULIASHKI, Vassil. Linear integer programming methods and approaches—a survey. **Journal of Cybernetics and Information Technologies**. v. 11, n. 1, 2011.

HARREL, Charles R. et al. **Simulação otimizando os sistemas**. São Paulo: Belge IMAM, 2002.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2010. p. 852

KANG, Yongha et al. The impact of lot-sizing in multiple product environments with congestion. **Journal of Manufacturing Systems**. [S.l.] v. 33, n. 3, p. 436-444, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.04.003> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

KIM, J. S.; KANG, Suk-Ho; LEE, Shen-Ming. **Transfer batch scheduling for a two-stage flowshop with identical parallel machines at each stage**. [S.l.] Omega, v. 25, n. 5, p. 547-555, 1997. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483\(97\)00015-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483(97)00015-7) >. Acesso em: 17 jan. 2015.

LANGÉVIN, André; RIOPEL, Diane; STECKE, Kathryn E. Transfer batch sizing in flexible manufacturing systems. **Journal of Manufacturing Systems**. [S.l.] vol. 18 n. 2, 1999. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6125\(99\)80018-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6125(99)80018-1) >. Acesso em: 17 jan. 2015.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation Modeling and Analysis**. 2. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1991.

LOBO, Carlos E. A. V. **Proposta de metodologia para incremento do desempenho da manufatura através da técnica de simulação**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica – Materiais e Processos de Fabricação. Campinas, 1997.

MIGUEL, Paulo A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. São Paulo, **Revista Produção**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MORTEZAEI, Navid; ZULKIFLI, Norzima. Integration of Lot Sizing and Flow Shop Scheduling with Lot Streaming. **Journal of Applied Mathematics**. [S.l.] v. 2013, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1155/2013/216595> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

NEJATI, Mohsen et al. Multi-job lot streaming to minimize the weighted completion time in a hybrid flow shop scheduling problem with work shift constraint. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. [S.l.] v. 70, n. 1-4, p. 501-514, 2014. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-013-5265-6> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

NEVE, Andrei. **Busca da melhoria na produtividade de uma pequena indústria moveleira, utilizando o auxílio da simulação computacional**. São Bernardo do Campo, 2011.

OLIVEIRA, Clênio S. Aplicação de técnicas de simulação em projetos de manufatura enxuta. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 4, n. 3, p. 204-217, 2008.

PORTUGAL, Licínio S. **Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005

POTTS, C. N.; BAKER, K. R. Flow shop scheduling with lot streaming. **Operations research letters**, v. 8, n. 6, p. 297-303, 1989.

_____, Chris N.; VAN WASSENHOVE, Luk N. Integrating scheduling with batching and lot-sizing: a review of algorithms and complexity. **Journal of the Operational Research Society**. p. 395-406, 1992.

REITER, Stanley. A system for managing job-shop production. **Journal of Business**, Chicago p. 371-393, 1966.

SARIN, Subhash C.; YAO, Liming; TRIETSCH, Dan. Single batch lot streaming in a two stage assembly system. **International Journal of Planning and Scheduling**. [S.l.] v. 1, n. 1, p. 90-108, 2011. Disponível em: < <http://inderscience.metapress.com/content/75t5q73646856318/fulltext.pdf> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

SEGURA, Andres R.; GOMEZ, Gasquet P.; ANDRES, Romano C. A review of lot streaming in a flow shop environment with makespan criteria. **6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management**. 2012. p. 316-323.

ŞEN, Alper; TOPALOĞLU, Engin; BENLİ, Ömer S. Optimal streaming of a single job in a two-stage flow shop. **European Journal of Operational Research**. [S.l.] v. 110, n. 1, p. 42-62, 1998. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00203-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00203-3) >. Acesso em: 17 jan. 2015.

SHINGO, Shigeo. **O Sistema Toyota de Producao Do Ponto**. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SILVA, Liane M. F.; PINTO, Marcel G.; SUBRAMANIAN, Anand. Utilizando o software Arena como ferramenta de apoio ao ensino em engenharia de produção. **Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2007.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SRISKANDARAJAH, Chelliah; WAGNEUR, Edouard. Lot streaming and scheduling multiple products in two-machine no-wait flowshops. **IIE transactions**, [S.l.] v. 31, n. 8, p. 695-707, 1999. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1007643210135> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

SWAIT, Joffre; BEN-AKIVA, Moshe. Incorporating random constraints in discrete models of choice set generation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 21, n. 2, p. 91-102, 1987.

TAYLOR III, Lloyd J. **A simulation study of WIP inventory drive systems and their effect on financial measurements**. *Integrated Manufacturing Systems*, v. 10, n. 5, p. 306-315, 1999.

TRIETSCH, Dan; BAKER, Kenneth R. **Basic techniques for lot streaming**. *Operations Research*, [S.l.] v. 41, n. 6, p. 1065-1076, 1993. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1287/opre.41.6.1065> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

VICKSON, R. G. Optimal lot streaming for multiple products in a two-machine flow shop. **European Journal of Operational Research**. [S.l.] v. 85, n. 3, p. 556-575, 1995. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0366-6](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0366-6) >. Acesso em: 17 jan. 2015.

WATSON, K. J.; PATTI, A. A comparison of JIT and TOC buffering philosophies on system performance with unplanned machine downtime. **International Journal of Production Research**. [S.l.] v. 46, n. 7, p. 1869-1885, 2008. Disponível em: < <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540600972943> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

YANG, Taho; SHEN, Yu-An. The dynamic transfer batch-size decision for thin film transistor-liquid crystal display array manufacturing by artificial neural-network. **Computers & Industrial Engineering**, [S.l.] v. 60, n. 4, p. 769-776, 2011. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.01.012> >. Acesso em: 17 jan. 2015.

ZAGONEL, Evaldo; CLETO, Marcelo G. Estudo para a implantação do fluxo unitário de peças numa célula de usinagem por meio de simulação. **XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 27., Foz do Iguaçu 2007.

APÊNDICE

Modelo de simulação elaborado no software Plant Simulation v11.1

