

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**LYNCEO FALAVIGNA BRAGHIROLI**

**ESTUDO DA LINEARIDADE DA PRODUÇÃO EM CÉLULAS DE**  
**MANUFATURA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO A EVENTOS**  
**DISCRETOS**

Porto Alegre

2009

LYNCEO FALAVIGNA BRAGHIROLI

**ESTUDO DA LINEARIDADE DA PRODUÇÃO EM CÉLULAS DE  
MANUFATURA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO A EVENTOS  
DISCRETOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Giovana Savitri Pasa, Dr<sup>ª</sup>.

Porto Alegre

2009

LYNCEO FALAVIGNA BRAGHIROLI

**ESTUDO DA LINEARIDADE DA PRODUÇÃO EM CÉLULAS DE  
MANUFATURA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO A EVENTOS  
DISCRETOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof.<sup>a</sup> Giovana Savitri Pasa, Dr.<sup>a</sup>**

Orientadora PPGEP/UFRGS

---

**Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.**

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Professor Fernando Gonçalves Amaral, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professor Gustavo Severo de Borba, Dr. (PPG Eng. de Produção/UNISINOS)

Professor Paulo Ghinato, Ph.D. (PPGEP/UFPE)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, pelo incentivo e auxílio durante a realização deste trabalho.

À minha orientadora, Giovana Savitri Pasa, pelos conhecimentos transmitidos e pelo tempo dedicado à minha formação.

Aos membros da banca, pelas contribuições realizadas que enriqueceram o trabalho.

Aos colegas e amigos do LOPP, Laboratório de Otimização de Produtos e Processos, pelas discussões e pelo companheirismo durante esta jornada.

Às empresas que abriram as suas portas para a realização deste trabalho, contribuindo, assim, para o desenvolvimento de um trabalho com base na realidade das empresas.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo financiamento desta pesquisa.

Aos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O atual meio no qual as empresas estão inseridas é caracterizado por mudanças freqüentes na demanda de seus produtos. Para que obtenham sucesso frente à concorrência, é necessário que as empresas saibam lidar com estas variações. No contexto da manufatura celular, uma das possibilidades de ajuste da produção à demanda é através da alteração do número de operadores que atuam nas células. Entretanto, o ambiente competitivo exige que tais mudanças não interfiram na produtividade da mão-de-obra, devido ao seu impacto nos custos. Assim, este trabalho visa estudar o efeito da alteração do número de operadores sobre a produtividade da mão-de-obra em células de manufatura. Neste contexto, é afirmado na literatura que existe uma relação linear entre o número de operadores e a produção das células, chamada linearidade da mão-de-obra. Esta linearidade é resultado da produtividade constante dos operadores, independentemente do número de operadores na célula. Através de três estudos de caso no setor metal-mecânico, foram observadas células em funcionamento para verificar esta relação. Utilizando-se a simulação computacional, para cada célula estudada foi gerado um modelo do estado atual que representa o funcionamento observado na célula, e um modelo alternativo que representa a célula com outro número de operadores. Os resultados obtidos na simulação do cenário alternativo foram confrontados com estimativas realizadas através da hipótese de linearidade da mão-de-obra. Dos três casos observados, apenas um apresentou comportamento linear. Os outros dois casos apresentaram um comportamento não-linear. Como fontes desta não-linearidade foram encontrados: o balanceamento das atividades entre os operadores, a relação entre os operadores e o tempo de ciclo automático dos equipamentos e a alteração nos deslocamentos dos operadores.

**Palavras-chave:** Célula. Manufatura. Produtividade. Linearidade. Simulação.

## ABSTRACT

The current environment where companies operate is characterized by frequent changes in the demand for their products. To achieve success against competitors, it is necessary for companies to know how to deal with these variations. One of the possibilities of adjusting production to demand in the context of cellular manufacturing is by changing the number of operators in the cells. However, the competitive environment requires that such changes do not interfere in the labor productivity due to its impact on costs. This work aims to study the effect of changing the number of operators on the labor productivity in manufacturing cells. In this context, it is stated in the literature that there is a linear relationship between the number of operators and the cells production, called labor linearity. This linearity is a result of constant operator productivity, irrespective of the number of operators in the cell. Through three case studies in metal-mechanical sector, cells operations were observed to verify this relationship. Using computer simulation, a model was created that represents the current operational state observed in the cell for each cell studied, and an alternative model that represents a cell with another number of operators. The results obtained from the simulation of the alternative model were compared with estimates made on the assumption of labor linearity. Only one of the three cases observed showed linear behavior. The other two cases showed a nonlinear behavior. As sources of nonlinearity we found: the balance of activities between operators, the relation between the operators and the equipment automatic cycle time and the change in the displacement of the operators.

**Keywords:** Cell. Manufacturing. Productivity. Linearity. Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre o número de operadores e (i) peças produzidas, e (ii) produção média por operador – em sistemas de manufatura em geral. ....	11
Figura 2: Relação entre o número de operadores e (i) peças produzidas, e (ii) produção média por operador – em células de manufatura. ....	12
Figura 3: Exemplo de sistema de manufatura celular. ....	20
Figura 4: Níveis de automação dos equipamentos. ....	24
Figura 5: Movimentação dos operadores no sentido do produto. ....	27
Figura 6: Movimentação dos operadores no sentido contrário ao do produto. ....	28
Figura 7: Exemplo de folha de Rotina de Operações Padronizada. ....	29
Figura 8: Balanceamento da quantidade de trabalho para fabricar uma peça: (a) célula, (b) linha. ....	30
Figura 9: Número de operadores por célula. ....	32
Figura 10: Células como blocos de estruturas mais complexas. ....	34
Figura 11: Formas de estudar um sistema real. ....	36
Figura 12: Modelagem e simulação. ....	37
Figura 13: Passos num estudo de simulação. ....	43
Figura 14: Relação entre a confiança no modelo e o (i) custo, (ii) tempo e (iii) valor do modelo. ....	45
Figura 15: Estrutura para avaliação da linearidade da mão-de-obra. ....	58
Figura 16: Representação esquemática da célula para o cenário atual (três operadores), caso 1. ....	63
Figura 17: Atividades do operador 1, caso 1. ....	65
Figura 18: Atividades do operador 2, caso 1. ....	66
Figura 19: Atividades do operador 3, caso 1. ....	66
Figura 20: Gráfico do tempo de ciclo para a definição do tempo de <i>warm-up</i> . ....	69
Figura 21: Gráfico do tempo de atravessamento para a definição do tempo de <i>warm-up</i> . ....	70
Figura 22: Representação esquemática da célula para o cenário alternativo (dois operadores), caso 1. ....	72
Figura 23: Atividades do operador 2 no cenário alternativo, caso 1. ....	73
Figura 24: Atividades do operador 3 no cenário alternativo, caso 1. ....	74
Figura 25: Gráfico do tempo de ciclo para definição do período de <i>warm-up</i> do cenário alternativo, caso 1. ....	74

Figura 26: Gráfico do tempo de atravessamento para definição do período de warm-up do cenário alternativo, caso 1.....	75
Figura 27: Gráfico de balanceamento dos operadores (i) cenário atual e (ii) cenário alternativo, caso 1.....	78
Figura 28: Representação esquemática da célula para o cenário atual (três operadores), caso 2. ....	80
Figura 29: Atividades do operador 1, caso 2.....	84
Figura 30: Atividades de inspeção do operador 1, caso 2.....	85
Figura 31: Atividades do operador 2, caso 2.....	86
Figura 32: Atividades de lote e inspeção do operador 2, caso 2. ....	86
Figura 33: Atividades do operador 3, caso 2.....	87
Figura 34: Atividade de inspeção do operador 3, caso 2. ....	87
Figura 35: Representação esquemática da célula para o cenário alternativo (dois operadores), caso 2. ....	94
Figura 36: Atividades de movimentação do cenário alternativo, caso 2. ....	95
Figura 37: Gráfico de balanceamento dos operadores, caso 2. ....	99
Figura 38: Representação esquemática da célula para o cenário atual (três operadores), caso 3. ....	101
Figura 39: Representação de E2, caso 3.....	102
Figura 40: Atividades do operador 1, caso 3.....	104
Figura 41: Atividades do operador 2, caso 3.....	105
Figura 42: Atividades do operador 3, caso 3.....	105
Figura 43: Atividade de formação do lote do operador 3, caso 3.....	105
Figura 44: Representação esquemática da célula para o cenário alternativo (dois operadores), caso 3. ....	110
Figura 45: Atividades do operador 2 no cenário alternativo, caso 3 .....	111
Figura 46: Gráfico de balanceamento para os operadores, caso 3.....	114
Figura 47: Fatores de influência na linearidade da mão-de-obra. ....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Razões para a utilização de células de manufatura. ....	21
Tabela 2: Tempo de ciclo automático por equipamento, caso 1. ....	67
Tabela 3: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades dos operadores, caso 1. ....	68
Tabela 4: Validação pelo tempo de ciclo, caso 1.....	70
Tabela 5: Validação pelo tempo de atravessamento, caso 1. ....	71
Tabela 6: Produção por hora obtido para 3 e 2 operadores, caso 1. ....	76
Tabela 7: Utilização dos operadores no cenário atual, caso 1.....	77
Tabela 8: Utilização dos operadores no cenário alternativo, caso 1.....	77
Tabela 9: Tempo de ciclo automático por equipamento, caso 2. ....	89
Tabela 10: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades do operador 1, caso 2. ....	90
Tabela 11: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades do operador 2, caso 2. ....	90
Tabela 12: Distribuições de probabilidade ajustadas as atividades do operador 3, caso 2. ....	91
Tabela 13: Distribuições de probabilidade ajustadas a troca de inserto, caso 2.....	91
Tabela 14: Característica das trocas de inserto por equipamento, caso 2. ....	92
Tabela 15: Validação do modelo atual, caso 2. ....	92
Tabela 16: Produção por hora obtida para 3 e 2 operadores, caso 2.....	97
Tabela 17: Utilização dos operadores no cenário atual, caso 2.....	98
Tabela 18: Utilização dos operadores no cenário alternativo, caso 2.....	98
Tabela 19: Tempo de ciclo automático por equipamento, caso 3. ....	106
Tabela 20: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades dos operadores, caso 3. .	107
Tabela 21: Característica das trocas de inserto por equipamento, caso 3. ....	107
Tabela 22: Validação do modelo atual, caso 3. ....	108
Tabela 23: Produção por hora obtido para 3 e 2 operadores, caso 3. ....	112
Tabela 24: Utilização dos operadores no cenário atual, caso 3.....	113
Tabela 25: Utilização dos operadores no cenário alternativo, caso 3.....	113
Tabela 26: Características das células observadas.....	115
Tabela 27: Característica da demanda das células observadas.....	115
Tabela 28: Produção por hora para os três casos.....	117
Tabela 29: Percentual de utilização dos operadores nos três casos. ....	119

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>1.1</b>	<b>Tema e Objetivos</b> .....	11
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	13
<b>1.3</b>	<b>Método</b> .....	14
<b>1.4</b>	<b>Delimitações do Trabalho</b> .....	15
<b>1.5</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b> .....	16
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>Manufatura Celular</b> .....	17
2.1.1	Definição de célula de manufatura.....	17
2.1.2	Formas de classificar as células de manufatura.....	19
2.1.3	Exemplo de sistema de manufatura baseado em células.....	19
2.1.4	Razões para o uso de células.....	21
2.1.5	Formação de famílias e agrupamento de equipamentos.....	22
2.1.6	Características dos equipamentos utilizados em células.....	23
2.1.7	Características dos operadores utilizados em células.....	26
2.1.8	Mudanças no número de operadores.....	32
2.1.9	Estudos com simulação de células.....	34
<b>2.2</b>	<b>Simulação</b> .....	35
2.2.1	Sistemas, modelos e simulação.....	36
2.2.2	Classificação dos modelos de simulação.....	38
2.2.3	Mecanismo de avanço do tempo.....	39
2.2.4	Geradores de Números Aleatórios – GNA.....	40
2.2.5	Aplicabilidade da simulação.....	41
2.2.6	Passos em um estudo com simulação.....	42
2.2.7	Áreas de aplicação da simulação na manufatura.....	54
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	56
<b>3.1</b>	<b>Seleção das Células para o Estudo</b> .....	56
<b>3.2</b>	<b>Modelagem e Simulação das Células Selecionadas</b> .....	56
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	60
<b>4.1</b>	<b>Seleção das Células para o Estudo: Aplicação</b> .....	60
<b>4.2</b>	<b>Modelagem e Simulação das Células Selecionadas: Aplicação</b> .....	61
4.2.1	Caso 1: Empresa A.....	61
4.2.2	Caso 2: Empresa B.....	79
4.3.3	Caso 3: Empresa C.....	100
<b>4.3</b>	<b>Discussão dos Resultados</b> .....	114
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	123
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	125
	<b>APÊNDICE A – Caso 1</b> .....	132
	<b>APÊNDICE B – Caso 2</b> .....	144
	<b>APÊNDICE C – Caso 3</b> .....	170

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das características marcantes da sociedade moderna é sua capacidade de gerar e difundir informações. É sabido que, nos dias atuais, o acesso à informação está facilitado pelas tecnologias de comunicação. Como consequência, estabeleceu-se a integração dos mercados consumidores, resultando no aumento da concorrência entre empresas. As alternativas encontradas pelas empresas para sobreviver neste cenário envolvem: aumento do volume de informação e de comunicação que a empresa necessita, aumento da variedade de produtos oferecidos, redução dos lotes de fabricação, melhoria na qualidade dos produtos e redução dos prazos de entrega, entre outros (BULLINGER, SCHWEIZER, 2006; BLACK, 1991).

Uma vez que as empresas passam a atender com maior cuidado as necessidades de seus clientes, estas também têm que lidar com as variações em suas demandas. Tais variações podem ser resultado de uma sazonalidade inerente a natureza do produto, assim como podem surgir da mudança de fase no ciclo de vida dos produtos. Conseqüentemente, no contexto atual, também é necessária às empresas uma maior flexibilidade no atendimento à demanda de seus clientes.

A manufatura celular tem sido considerada pelas empresas como uma alternativa para enfrentar os desafios impostos pelo mercado. Entre as principais razões para a utilização de células de manufatura estão: a redução do tempo de atravessamento, redução dos estoques intermediários, melhorias na qualidade e redução do tempo de resposta a pedidos de clientes (WEMMERLOV; JOHNSON, 1997). Segundo Rother e Harris (2002), as empresas que adotam células de manufatura possuem diferentes formas de reagir às variações na demanda dos clientes. As flutuações diárias da demanda podem ser administradas através de estoques de produtos acabados. Uma segunda alternativa é a utilização de horas extras. Outra forma apresentada pelos autores consiste na alteração do número de operadores que trabalham nas células. Frente a alterações mais severas na demanda, deve-se utilizar a terceira alternativa apresentada, a qual altera a produção através do ajuste do número de operadores na célula. Esta medida possui impacto direto sobre o custo dos produtos, conforme Ballé e Ballé (2005). Segundo estes autores, em um cenário de diminuição da produção, os custos unitários relativos à mão-de-obra tendem a aumentar devido ao menor volume produzido. Porém, havendo flexibilidade na mão-de-obra, esta poderá ser realocada, visando manter os custos dos produtos constantes. Esta capacidade de controlar os custos relativos à mão-de-obra reforça a capacidade da empresa em superar as flutuações do mercado.

## 1.1 Tema e Objetivos

Para que, através da alteração no número de operadores, a produção possa acompanhar as variações na demanda de forma eficiente, é necessário que a produtividade individual dos operadores não seja afetada pela variação no número de operadores. Se, ao duplicar (ou reduzir à metade) a mão-de-obra alocada à determinada tarefa, a produção deste grupo também duplicar (ou reduzir à metade), isto significa que a produtividade da mão-de-obra inicial não foi alterada. Esta estabilidade na produtividade facilita o controle dos custos de mão-de-obra e a alocação desta de acordo com as necessidades de produção.

Quando a produtividade individual é constante em relação ao número de operadores, o acréscimo/decrécimo de um operador aumenta/diminui a produção em uma quantidade constante, resultando em um comportamento linear. Ou seja, a produção total do grupo apresenta um comportamento linear com relação ao número de operadores. Entretanto, na literatura existem trabalhos sugerindo que este não é o comportamento encontrado nos sistemas de manufatura em geral (PINDYCK; RUBINFELD, 2006; BILAS, 1991). Normalmente, a relação entre o número de trabalhadores e sua produção total segue um comportamento não-linear, apresentado na Figura 1 (i). Inicialmente, o acréscimo de um operador aumenta o rendimento individual dos trabalhadores devido à especialização das atividades e à economia de movimentos. Isto pode ser observado na Figura 1 (ii), que apresenta a produtividade individual dos operadores (produção total dividida pelo número de operadores), onde, na mudança de um para dois e de dois para três operadores, houve um aumento na produtividade individual. Porém, após determinado número de operadores, o

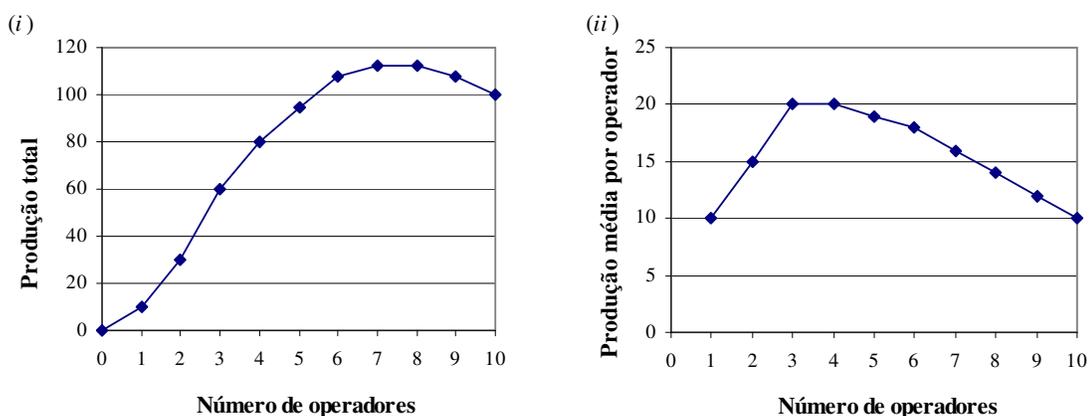


Figura 1: Relação entre o número de operadores e (i) peças produzidas, e (ii) produção média por operador – em sistemas de manufatura em geral.

Fonte: adaptado de Pindyck e Rubinfeld (2006, p. 164).

rendimento individual diminuirá, devido à maior dificuldade de coordenação do grupo de trabalhadores, entre outros fatores. Este decaimento da produtividade é observado na Figura 1 (ii) entre quatro e dez operadores. Nesta situação existe um ponto de maior rendimento individual, entre três e quatro operadores, que representa a condição ideal de funcionamento (PINDYCK; RUBINFELD, 2006; BILAS, 1991).

Isto sugere a necessidade de uma forma especial de organização do trabalho para obter uma relação linear entre a produção total e o número de operadores. Segundo Black (2007) e Rother e Harris (2002), isto pode ser obtido através da organização em células. Tais estudos afirmam que nas células o rendimento dos operadores é constante com relação ao número de operadores alocados à célula, conforme Figura 2 (i) e (ii). Esta condição é denominada por Rother e Harris (2002) de linearidade da mão-de-obra. Desse modo, os autores sugerem a viabilidade de, em arranjos celulares, fazer frente às variações na demanda através da realocação da mão-de-obra.

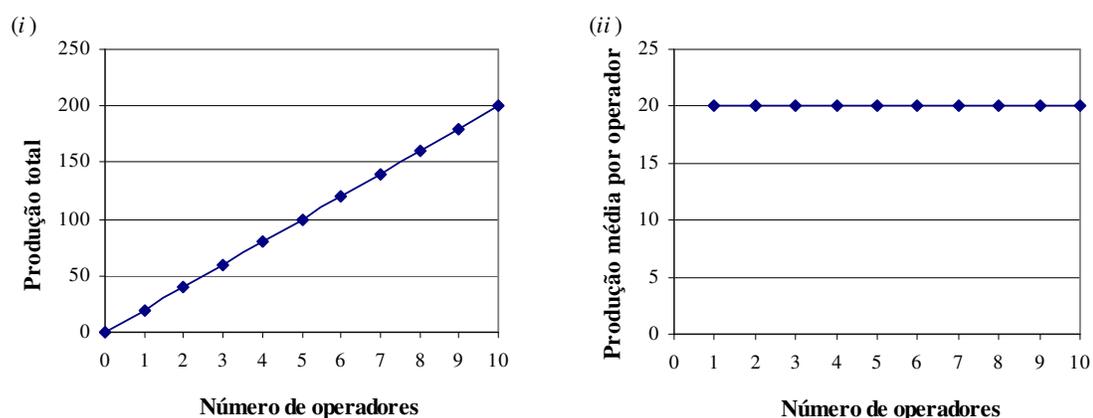


Figura 2: Relação entre o número de operadores e (i) peças produzidas, e (ii) produção média por operador – em células de manufatura.

Fonte: adaptado de Black (2007, p. 3654) e Rother e Harris (2002, p. 72).

Para investigar a linearidade da mão-de-obra, é necessária uma abordagem capaz de representar adequadamente as células e a variação no número de operadores. Este problema é bem atendido pela simulação computacional. A simulação é uma ferramenta que visa representar o comportamento de sistemas do mundo real (LAW, 2007). Esta é indicada para situações que envolvam sistemas complexos e com elementos probabilísticos. Tais características estão presentes nas células, pois a atividade manual dos operadores naturalmente apresenta variabilidade. Ainda, a interação entre os operadores e entre os operadores e equipamentos tornam complexas as relações que definem o desempenho da célula.

Visto que esta condição de linearidade da mão-de-obra não é usual nos sistemas de manufatura em geral, cabe investigar se, de fato, este comportamento é observado em células em funcionamento. Uma vez que se dispõe da simulação para auxiliar nesta investigação, constitui-se como objetivo geral deste trabalho: estudar a aderência entre o comportamento linear previsto pela literatura para as células e o comportamento observado nas implementações de células em empresas do setor metal-mecânico, através do uso da simulação computacional.

Como objetivos específicos têm-se:

- (i) verificar se as células estudadas apresentam resultados que denotam um comportamento linear; e,
- (ii) buscar explicações para a ocorrência ou não do comportamento linear nas células.

## 1.2 Justificativa

A manufatura celular tem demonstrado aceitação por partes das empresas. Isto pode ser percebido a partir do estudo de Johnson e Wemmerlöv (2004), onde em uma *survey* realizada, das 150 empresas respondentes, 79% possuíam células em seus sistemas produtivos. Em Ahmed, Montagno e Firenze (1996), das 655 empresas respondentes, aproximadamente 43% utilizavam células de manufatura. Já em Waterson et al. (1999), das 5608 empresas pesquisadas, aproximadamente 50% utilizavam células de manufatura. Esta aceitação por parte das empresas tem motivado o desenvolvimento de diversos estudos acerca deste tema.

Entre as publicações sobre células, a literatura presente já dispõe de acervo sobre técnicas para formação de células, constituindo-se de uma das principais linhas de pesquisa na área. Entre estas obras estão Bhandwale e Kesavadas (2008), Balakrishnan e Cheng (2007), Pillai e Subbarao (2008), Schaller (2007), Arzi, Bukchin e Masin (2001), Groover (2001), Askim, Selim e Vakharia (1997), Burbidge (1992, 1991), Optiz e Wiendahl (1971). Outra linha de pesquisa em células, que tem sido explorada, diz respeito à alocação dos operadores. Exemplos destas obras são Shewshuk (2008), Nakade e Nishiwaki (2008), Cesani e Steudel (2005), Ertay e Ruan (2005), Askin e Huang (2001). A presença destes trabalhos na literatura reforça a importância deste tema no meio acadêmico.

A flexibilidade e a responsividade da manufatura são fundamentais para a sobrevivência das empresas, uma vez que o ambiente em que as organizações estão inseridas

possui como característica rápidas e significativas variações na demanda. Portanto, há necessidade de estudos que abordem explicitamente os modos de responder a estas variações na demanda, visando o ganho de flexibilidade e reponsividade da manufatura. No contexto das células, uma das formas de resposta a este ambiente é através da variação do número de operadores alocados às células, objeto de estudo desta dissertação. Ainda, foi encontrado apenas o estudo de Black e Schroer (1993) que observa esta condição na prática, sendo esta observação feita em uma célula de montagem em uma empresa de artigos de vestuário. Portanto, cabem estudos para verificar esta condição num ambiente de células com características de fabricação, típicas do setor metal-mecânico.

Por fim, a simulação computacional apresenta-se como uma ferramenta de investigação em ambientes complexos e com variabilidade. A simulação possui base teórica já consolidada, estando entre as três técnicas mais utilizadas da pesquisa operacional (GUPTA, 1997; LANE; MANSOUR; HARPELL, 1993). Esta técnica também tem sido utilizada em estudos com células, como pode ser observado a partir de Chtourou, Jerbi e Maalej (2008), Ekren e Ornek (2008), Elleuch et al. (2008), Pitchuka, Adil e Ananthakumar (2006), Djassemi (2005), Johnson (2005), Li (2005), Yazici (2005), Agarwal e Sarkis (1998), Johnson e Wemmerlöv (1996), Shafer e Charnes (1995), Morris e Tersine (1994), Suresh e Meredith (1994), Burgess, Morgan e Vollmann (1993), Black e Schroer (1993) e Garza e Smunt (1991). A presença destes estudos reforça a adequação da simulação no presente estudo.

### **1.3 Método**

O presente trabalho pode ser classificado quanto aos seus objetivos como descritivo-explicativo (GIL, 2002; SANTOS, 2000). Descritivo, pois visa apresentar com maior riqueza de detalhes o funcionamento das células de manufatura e os efeitos resultantes da alteração no número de operadores. Explicativo, por buscar esclarecer os fatores que podem influenciar a condição de linearidade da mão-de-obra. Quanto à abordagem da pesquisa, esta possui característica tanto qualitativa, pois utiliza entrevistas e observação direta, quanto quantitativa, pois utiliza a simulação computacional.

Quanto ao procedimento geral utilizado, esta pesquisa classifica-se como estudo de caso, pois consiste num estudo aprofundado de poucos objetos, visando obter um conhecimento detalhado sobre suas características (YIN, 2005; GIL, 2002). Segundo Yin (2005), o estudo de caso caracteriza-se como uma investigação empírica, investigando um fenômeno contemporâneo em seu contexto, onde os limites entre o fenômeno e o contexto

não estão claramente definidos. Esta estratégia apresenta-se adequada a esta pesquisa, pois os fatores presentes na célula (contexto) que influenciam a linearidade da mão-de-obra (fenômeno) não estão claramente definidos. Ainda, o estudo de caso apresenta-se vantajoso quando o pesquisador não possui controle sobre o fenômeno e seu contexto (YIN, 2005), correspondendo, neste estudo, à impossibilidade do pesquisador alterar o funcionamento das células estudadas.

Com vistas aos objetivos do trabalho, estruturou-se um método composto por duas etapas. Primeiramente, realizou-se o processo de seleção de células para o estudo. A partir da seleção das células a serem estudadas, deu-se início à segunda etapa do método, onde foi realizada a modelagem e simulação das células, com base na observação direta das mesmas e em entrevistas. Para a simulação das células foi desenvolvido um modelo conceitual e um modelo computacional, implementado utilizando-se o *software* de simulação ProModel. Para guiar o processo de simulação das células, optou-se por utilizar como referência o método proposto por Law (2007). O estudo das células exigiu o acompanhamento destas por um período de aproximadamente três meses, contendo em média uma visita por semana. Para o caso 1 foram realizadas 9 visitas de três a quatro horas, para o caso 2 ocorreram 15 visitas de quatro a cinco horas e para o caso 3 foram realizadas 7 visitas de quatro a cinco horas. As diferenças entre os tempos de observação dos três casos decorreram das particularidades de cada célula, estando diretamente associados ao número de atividades realizadas pelos operadores e ao tamanho das amostras necessárias para a simulação. Ao término desta etapa do método realizou-se a análise dos resultados obtidos a partir dos três casos.

#### **1.4 Delimitações do Trabalho**

Todas as células observadas pertencem a empresas que atuam no setor metal-mecânico e que possuem mais de 900 funcionários. Por tratar-se de um estudo com células em funcionamento nas empresas, seu processo de formação está fora do escopo deste trabalho. Ainda, delimitou-se o foco deste trabalho sobre as células com características de fabricação, em distinção às células de montagem, restringindo as conclusões do estudo.

Para cada célula selecionada, foi considerado como representação da célula o modelo realizado para a família de maior volume. A escolha da modelagem de uma família por célula não afeta a análise em questão, pois a linearidade da mão-de-obra deve ser verificada a cada família. Assim, a análise da influência de fatores como o *setup* fica prejudicada, estando fora

do escopo deste trabalho. Portanto, os resultados obtidos são mais representativos de células responsáveis por apenas uma família.

Todas as células observadas possuíam três operadores, sendo o cenário alternativo constituído por uma representação com dois operadores, correspondendo a uma diminuição da demanda. Isto confere maior semelhança entre os casos analisados, porém pode ter evitado a identificação de outros fatores influentes na linearidade da mão-de-obra.

### **1.5 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentado o tema de pesquisa e o objetivo deste trabalho, juntamente com a justificativa da pesquisa, o método utilizado e as delimitações deste estudo. O segundo capítulo apresenta a revisão teórica realizada, compreendendo dois tópicos: células de manufatura e simulação.

O terceiro capítulo apresenta detalhadamente o método de pesquisa utilizado para alcançar o objetivo do trabalho. No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do método de pesquisa. Após a apresentação dos resultados, estes são confrontados com a literatura presente na revisão teórica para avaliar a validade e o significado dos resultados obtidos. Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões deste trabalho. Após esta síntese surgem as sugestões para trabalhos futuros, apresentadas no final do capítulo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico deste trabalho está dividido em duas partes. Na primeira parte são apresentados os conceitos relacionados à manufatura celular, mostrando seu contexto e características. A segunda parte consiste na revisão sobre simulação computacional e as recomendações da literatura na condução de estudos com simulação.

### 2.1 Manufatura Celular

Segundo Hyer e Wemmerlöv (2002), a empresa que opera uma ou mais células de manufatura é dita ter ou utilizar a manufatura celular. Neste contexto, o termo células de manufatura é utilizado em distinção às células presentes em escritórios. Segundo os autores, as células de manufatura têm como principal objetivo processar, transformar, transmitir e adicionar valor fisicamente aos materiais, cujo estado final são produtos ou componentes. Em contraposição, as células de escritório têm como objetivo processar, transformar, transmitir e adicionar valor às informações. Neste estudo são abordadas apenas células de manufatura, de acordo com a definição apresentada, de modo que, quando for utilizado apenas o termo célula, fica implícita esta restrição.

#### 2.1.1 Definição de célula de manufatura

Alguns autores definem célula de manufatura como uma aplicação da tecnologia de grupo, onde os componentes similares são agrupados em famílias e estes são processados em um subsistema chamado célula, composto de equipamentos distintos e dedicados (BHANDWALE; KESAVADAS, 2008; BALAKRISHNAN; CHENG, 2007; SCHALLER, 2007; GROOVER, 2001; AGARWAL; SARKIS, 1998; GARZA; SMUNT, 1991; GAITHER; FRAZIER; WEI, 1990). O termo tecnologia de grupo é definido por Groover (2001) como uma filosofia de manufatura na qual os componentes ou produtos similares são identificados e agrupados para obter vantagem das similaridades no seu projeto e produção

Entretanto, outros autores têm questionado se uma célula pode ser resumida a apenas esta parte técnica de agrupamento de equipamentos. Para Hyer e Brown (1999) uma das deficiências da definição apresentada é assumir que uma célula é apenas um tipo de *layout*. Segundo Wemmerlöv e Johnson (1997), a adoção da manufatura celular vai além do rearranjo do *layout*, envolvendo e modificando principalmente aspectos humanos e organizacionais.

Da mesma forma, a definição de Rother e Harris (2002) para célula mostra-se mais abrangente, indo além dos aspectos de *layout*. Para os autores, uma célula é o arranjo de pessoas, máquinas, materiais e métodos, através do qual as partes são processadas em um fluxo contínuo, estando as etapas do processo próximas e em ordem seqüencial. Semelhante à definição anterior, esta também considera a questão do arranjo dos equipamentos. Além disso, um elemento a ser destacado nesta definição é o fluxo contínuo. Segundo os autores, o propósito da célula é atingir e manter um eficiente fluxo contínuo. Isto significa que, idealmente, os itens são processados e movidos diretamente de um processo para o próximo, uma peça de cada vez.

Outra definição encontrada na literatura é proposta por Hyer e Wemmerlöv (2002). Para os autores, uma célula é um grupo de estações de trabalho próximas umas das outras onde múltiplas operações seqüenciais são realizadas sobre uma ou mais famílias de matérias-primas, peças, componentes, produtos semelhantes ou veículos de informação. Os autores continuam a definição afirmando que a célula é uma unidade organizacional distinta dentro da organização, apoiada por um ou mais empregados, avaliada por resultados, à qual é delegada a responsabilidade de uma ou mais atividades de planejamento, controle, suporte e melhoria. Novamente, encontra-se nesta definição a questão do arranjo das operações de modo seqüencial. A segunda parte da definição de Hyer e Wemmerlöv (2002) acrescenta a característica de independência da célula, que deve ter certa autonomia para gerir e melhorar a organização de seus recursos.

De modo geral, o que se percebe em comum nestas definições é que as células são compostas por equipamentos distintos, agrupados segundo as necessidades de processamento dos produtos. Também foi destacada a importância desta estrutura promover o fluxo contínuo, e possuir certa independência na gestão de seus recursos. Entretanto, para que seja possível distinguir claramente sistemas estruturados em célula daqueles baseados em linhas, considera-se necessário incluir mais um aspecto na definição de célula, já que uma linha pode atender as características mencionadas. Segundo Shewshuk (2008), a distinção entre estruturas celulares e em linha pode ser percebida na forma de alocação das atividades. Enquanto na linha as atividades são alocadas aos postos de trabalho, que contém um operador fixo ao posto, nas células os operadores é que são alocados às atividades, trabalhando em pé e caminhando, atendendo mais de um posto. Esta característica das células - alocação dos operadores às atividades - será comentada em maiores detalhes ao se discutirem as características dos operadores utilizados nas células.

Sintetizando, para este estudo as características que idealmente compõem uma célula são: o arranjo dos equipamentos segundo as necessidades de processamento dos produtos, a qual é complementada pelo fluxo contínuo, independência da estrutura e a alocação dos operadores às atividades.

### 2.1.2 Formas de classificar as células de manufatura

Encontram-se na literatura duas classificações para as células de manufatura, a primeira com relação à natureza das operações e a segunda quanto ao grau de automação. Na primeira, as células podem ser classificadas segundo a natureza das operações em: células de montagem e células de fabricação. Nas células de montagem, as operações realizadas costumam ser totalmente manuais, exigindo a presença do operador durante todo o processamento dos produtos. Por outro lado, nas células de fabricação, algumas operações são realizadas pelos equipamentos de forma autônoma, parando ao seu término, sem a presença do operador. Algumas operações simples que exijam a presença do operador, geralmente operações manuais, também podem ocorrer neste tipo de célula (BLACK, 1991).

A segunda classificação encontrada para as células refere-se ao grau de automação utilizado na célula. Quando o funcionamento da célula depende da presença do operador na maior parte do tempo, na movimentação das peças entre os postos de trabalho, carga e descarga dos equipamentos, inspeção, programação de equipamentos de comando numérico, entre outros, classifica-se a célula como uma célula manual. Por outro lado, quando a maior parte das atividades realizadas na célula está sob controle computacional, utilizando sistemas automatizados de processamento integrados com o sistema de movimentação, denomina-se célula automatizada, célula flexível de manufatura ou sistema de manufatura flexível (HYER; WEMMERLÖV, 2002; GROOVER, 2001; BLACK, 1991).

### 2.1.3 Exemplo de sistema de manufatura baseado em células

Para ilustrar a organização de um sistema de manufatura baseado em células, a Figura 3 mostra a estrutura apresentada por Black (1991; 2007). Esta forma de organização é constituída de uma linha de montagem final, abastecida por células de montagem. Por sua vez, os componentes necessários às células de montagem são abastecidos pelas células de fabricação.

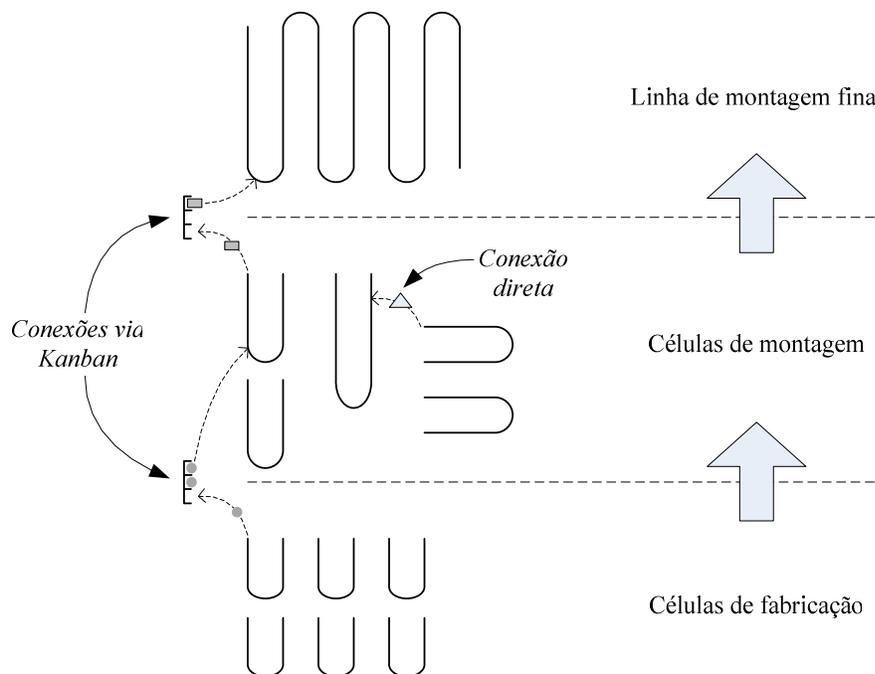


Figura 3: Exemplo de sistema de manufatura celular.  
 Fonte: adaptado de Black (2007, p. 3640).

Neste sistema, o controle da produção ocorre através de um sistema puxado, onde o processo seguinte define a produção do processo precedente. Esta cadeia inicia a partir da demanda dos clientes, que define o que deve ser produzido na linha de montagem final. Neste momento, as necessidades da linha de montagem, em termos de componentes, definem o que será montado nas células de montagem, que por sua vez, definem o que será produzido nas células de fabricação. A relação entre células pode ocorrer de forma direta, sem estoques, ou de forma indireta, através de um estoque com gerenciamento por meio de *kanbans* (BLACK, 1991; 2007).

Segundo Miltenburg (2001a), o objetivo de um sistema de manufatura celular é realizar todas as atividades necessárias dentro do *takt-time*, deixando objetivos tradicionais, como a alta utilização dos equipamentos e altos volumes de produção, em segundo plano. O *takt-time* define o ritmo necessário para atender a demanda dos clientes. Este é calculado a partir do tempo de produção disponível e da demanda para um dado produto, utilizando valores diários. O cálculo do *takt-time* é apresentado na expressão 1, onde *TT* corresponde ao *takt-time*, *TD* ao tempo disponível por dia em minutos e *DD* corresponde à demanda diária (BLACK, 2007; MILTENBURG, 2001a; PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM, 1999).

$$TT = \frac{TD}{DD} \quad (1)$$

Outro conceito relacionado ao funcionamento de uma célula é o tempo de ciclo (TC). Miltenburg (2001a) define o tempo de ciclo como o intervalo real entre a conclusão de duas unidades consecutivas de um dado produto. Para atender a demanda, o tempo de ciclo da célula deve ser menor que o *takt-time*. Assim, define-se como referência para o tempo de ciclo da célula um tempo de ciclo meta, com base na expressão 2. Nesta expressão, o tempo de ciclo meta (*TCM*) é uma fração do *takt-time* (*TT*), cuja diferença é definida pela tolerância especificada ( $\Theta$ ). Uma vez que a célula consiga atingir seu tempo de ciclo meta, a demanda dos clientes será atendida.

$$TCM = TT*(1 - \Theta) \quad (2)$$

#### 2.1.4 Razões para o uso de células

Segundo Wemmerlöv e Hyer (1989), em um estudo baseado em 32 empresas dos Estados Unidos que utilizam a manufatura celular, as cinco razões mais comuns para o uso de células são: redução de estoques em processo, do tempos de *setup*, do tempo de atravessamento e da movimentação de materiais, além do aumento na qualidade. Em outro estudo com dados de 46 empresas nos Estados Unidos, Wemmerlöv e Johnson (1997) obtiveram resultados semelhantes, confirmando quatro das cinco razões citadas como as mais importantes na utilização de células, exceto a redução no tempo de *setup*. Neste último estudo, cujo resultado é apresentado na Tabela 1, cada um dos itens foi avaliado em uma escala de um (sem importância) a cinco (muito importante) na adoção de células de manufatura.

Tabela 1: Razões para a utilização de células de manufatura.

Posição	Razão	Importância média
1	Redução do tempo de atravessamento	4,51
2	Redução do estoque intermediário	4,33
3	Melhoria da qualidade de peças e produtos	4,22
4	Redução do tempo de resposta a pedidos de clientes	4,22
5	Redução das distâncias/tempos de movimentação	4,14
6	Aumento da flexibilidade da manufatura	3,81
7	Redução do custo unitário	3,80
8	Simplificação do planejamento e controle da produção	3,62
9	Facilitar envolvimento dos funcionários	3,57
10	Redução do tempo de <i>setup</i>	3,43
11	Redução do estoque de produtos acabados	3,41

Fonte: Wemmerlöv e Johnson (1997, p. 33).

### 2.1.5 Formação de famílias e agrupamento de equipamentos

Na manufatura celular, as células são responsáveis pela produção de grupos de produtos, denominados famílias. Para que dois produtos pertençam à mesma família é necessário que eles possuam certa semelhança em seu processo de produção. Assim, a célula é constituída pelos equipamentos necessários à produção de uma ou mais famílias.

Os primeiros registros a respeito do uso de famílias e agrupamento de equipamentos são da década de mil novecentos e vinte. Em 1922, o livro intitulado *Gruppenfabrikation* - “produção em grupo”- foi publicado na Alemanha, descrevendo a experiência da *Daimler* em uma de suas fábricas. No ano de 1925, R. E. Flanders apresentou um artigo à *American Society of Mechanical Engineers* descrevendo a organização da manufatura na *Jones and Lamson Machine Company*. Neste trabalho, Flanders já havia percebido que o arranjo dos recursos de acordo com as necessidades de processamento dos produtos resultava em ganhos, tais como: redução das esperas, diminuição do tempo de movimentação e simplificação nos procedimentos de controle da produção, inventário e custos (HYER; WEMMERLÖV, 2002; GROOVER, 2001; SURESH; KAY, 1997).

Uma das primeiras formas de realizar o agrupamento de componentes em famílias foi através do processo de Inspeção Visual (GROOVER, 2001; HYER; WEMMERLÖV, 2002). Na Inglaterra, ainda na década de 60, John Burbidge desenvolveu outro método de formação de famílias de componentes, baseado nos roteiros de produção dos componentes. A Análise do Fluxo de Produção (*Production Flow Analysis – PFA*), como o método é chamado, ainda hoje é utilizada no processo de formação de famílias e desenvolvimento de sistemas produtivos baseados na tecnologia de grupo (GROOVER, 2001; BURBIDGE, 1992; BURBIDGE, 1991). Na Alemanha, Optiz e Wiendahl (1971) desenvolveram o Sistema de Classificação e Codificação, que considera as características físicas dos componentes no processo de formação das famílias. De acordo com Groover (2001), os métodos de Inspeção Visual, Análise do Fluxo de Produção e o Sistema de Classificação e Codificação são os três métodos gerais para realizar a formação de famílias. Atualmente existem outros métodos com a mesma finalidade, classificados segundo Silveira (1994) como: coeficiente de similaridade, método de arranjo de matrizes, técnicas baseadas em grafos, análise de agrupamentos, programação matemática, reconhecimento de padrões e técnicas diversas.

Recentemente, alguns trabalhos têm aprimorado os métodos de formação de células considerando as variações no *mix* e na demanda dos produtos, presentes na realidade das empresas. Segundo Schaller (2007), melhores resultados podem ser obtidos quando se

considera variações na demanda e mudanças nas células ao longo do horizonte de planejamento. Em seu trabalho, o autor permite modificações na composição da célula em termos de partes produzidas e equipamentos alocados à célula, como forma de lidar com as variações de longo prazo na demanda. De forma semelhante, Bhandwale e Kesavadas (2008) apresentam um modelo para incorporar novos produtos e equipamentos em um sistema de manufatura celular já existente. O objetivo do modelo é ajustar estes novos produtos e equipamentos ao sistema, aumentando a utilização dos equipamentos e reduzindo os investimentos. Já Pillai e Subbarao (2008) sugerem um método de formação de células capaz de lidar com as variações na demanda e no *mix* sem a necessidade de realocação de equipamentos entre as células. Isto é proposto através de um método que considera previsões multi-período para o *mix* produzido e para a demanda destes itens.

Balakrishnan e Cheng (2007) apresentam uma revisão da literatura sobre o projeto de células considerando um planejamento multi-período e incertezas com relação à demanda e equipamentos. Os autores argumentam que os procedimentos tradicionalmente utilizados no processo de formação de células ignoram as mudanças no *mix*, causadas pelo re-projeto de produto, e variações no volume, não correspondendo à realidade enfrentada pelas organizações. No processo de formação de células, Arzi, Bukchin e Masin (2001) destacam a importância de considerar a correlação entre produtos. Sem considerar este fator pode-se ter uma noção equivocada da variabilidade a qual a célula estará sujeita durante seu funcionamento, gerando falta ou excesso de capacidade. Esta correlação possui maior significado quando se considera a variabilidade da demanda. Outra alternativa para lidar com variações na demanda é proposta por Askim, Selim e Vakharia (1997). Os autores propõem um método de formação de células flexíveis. Neste contexto, entende-se por flexível a capacidade do sistema produtivo processar o mesmo produto em diferentes células e a capacidade de responder rapidamente às mudanças na demanda e no *mix*.

#### 2.1.6 Características dos equipamentos utilizados em células

Os equipamentos que compõem as células de manufatura possuem algumas características particulares para desempenhar suas atividades. O primeiro aspecto a ser observado diz respeito ao nível de automação dos equipamentos. Segundo Rother e Harris (2002), os diferentes níveis de automação podem ser representados pela Figura 4.

		Carga da Máquina	Ciclo da Máquina	Descarga da Máquina	Transferência de Peças
Níveis de Automação	1	☺	☺	☺	☺
	2	☺	Auto	☺	☺
	3	☺	Auto	Auto	☺
	A Grande Divisão				
	4	Auto	Auto	Auto	☺
	5	Auto	Auto	Auto	Auto

Figura 4: Níveis de automação dos equipamentos.  
Fonte: adaptado de Rother e Harris (2002, p. 38).

Nesta figura, o primeiro nível indica a ausência de automação, pois todas as atividades são realizadas com a presença do operador. Logo, este deve permanecer junto ao equipamento durante todo o tempo de processamento.

O segundo nível de automação indica a automação apenas do ciclo de máquina. Este nível de automação é o mínimo necessário para os equipamentos utilizados em células (ROTHER; HARRIS, 2002). Porém, a automação não garante a ausência de defeitos. Para esta finalidade, dispositivos capazes de detectar anomalias e parar automaticamente em decorrência destas também devem estar presentes. Este controle automático de defeitos é denominado automação. A partir da automação, os operadores podem realizar outras atividades enquanto o equipamento realiza seu trabalho, pois não é necessário operar o equipamento durante o processamento e nem monitorar sua operação (MONDEN, 1984).

Segundo Rother e Harris (2002), o nível 2 de automação pode ser insuficiente, exigindo também a automação da descarga do equipamento, nível 3 de automação. Isto é particularmente interessante quando a descarga e carga das peças exigem o uso das duas mãos do operador. Nesta situação, o trabalho do operador ficará facilitado se este, ao chegar com uma nova peça, puder colocá-la imediatamente no equipamento. A partir do nível 3 de automação observa-se um aumento da complexidade técnica e dos custos de automação, denominada pelos autores de a grande divisão. Este aumento de complexidade deve-se à necessidade de automação da carga das peças na máquina, nível 4, que exige maior precisão do que na descarga das mesmas. Ainda, os autores afirmam que o nível 5 de automação, envolvendo a transferência das peças, geralmente possui custo elevado e dificulta o acompanhamento das variações na demanda.

Os equipamentos utilizados nas células devem ser de fácil movimentação, permitindo experimentar novos arranjos ou mover o equipamento para outro local quando ocorrerem mudanças na seqüência de processamento dos itens. Ainda, devem possuir facilidade de *setup*,

permitindo produzir maior variedade de produtos em um mesmo turno. Com relação ao *setup* destes equipamentos, é enfatizado que este deve ser reduzido ao máximo, através das técnicas de redução de *setup*. Tais equipamentos devem ser dedicados à célula e de tamanho reduzido, podendo possuir menor produtividade, desde que atinjam o ritmo necessário para o atendimento da demanda dos itens produzidos na célula. Uma consequência decorrente destas características é que estes equipamentos tendem a possuir menor valor de aquisição (BLACK, 2007; PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM, 1999; BLACK, 1991).

Segundo Rother e Harris (2002), deve-se avaliar com cuidado a capacidade de atendimento da demanda por parte dos equipamentos. Para este fim, deve-se utilizar o chamado tempo efetivo de ciclo de máquina. O tempo efetivo de ciclo de máquina é constituído pela soma do tempo de ciclo da máquina por peça, do tempo de carga e descarga e do tempo de troca dividido pelo número de peças entre trocas. Recomenda-se, ainda, que o tempo de ciclo efetivo da máquina não seja mais do que 80% do *takt-time*. Em casos onde não se possa atender esta condição, existem algumas medidas a serem adotadas. Uma alternativa é melhorar o processo de descarga, carga e início do ciclo. Também se pode eliminar os desperdícios no ciclo da máquina, através da diminuição da movimentação das peças na máquina, por exemplo. Outra forma de reduzir o tempo de ciclo da máquina é aumentar a velocidade de trabalho do equipamento, através, por exemplo, da alteração da velocidade de corte, profundidade ou outras características técnicas. Entretanto, estas alterações podem resultar em perdas de qualidade ou confiabilidade do processo. Caso seja necessário, podem-se dividir as tarefas do equipamento e distribuí-las em mais de um equipamento, utilizando-se neste caso equipamentos mais simples e com menor tempo de ciclo. Finalmente, pode-se replicar o equipamento, sendo que os equipamentos adicionados devem realizar um trabalho idêntico (ROTHER; HARRIS, 2002; BLACK, 1991).

O arranjo destes equipamentos geralmente segue um *layout* em forma de U. Segundo Monden (1984), a principal vantagem deste arranjo se deve à flexibilidade para aumentar ou reduzir o número de operadores, permitindo o ajuste da produção às variações na demanda. Este *layout* também contribui para a produção no tempo exato, através do controle da entrada e saída de materiais da célula (MONDEN, 1984). Estes aspectos do *layout* serão abordados em mais detalhes nas seções seguintes deste capítulo.

Com relação ao número de equipamentos por célula, Wemmerlöv e Hyer (1989) constataram que em média as células manuais possuem mais equipamentos do que as células automatizadas. Neste estudo, entre as 32 empresas analisadas, a média de equipamentos em cada célula foi de 6,2 por célula. Já nas células automatizadas a média foi de 4,7

equipamentos por célula. Em outro estudo, baseado em 9 células manuais nos Estados Unidos e 105 no Japão, Miltenburg (2001b) constatou uma média de 10,2 equipamentos por célula manual. Apesar dos resultados dos estudos apresentarem diferenças, estes valores auxiliam na compreensão do tamanho das células observadas na prática.

### 2.1.7 Características dos operadores utilizados em células

Ao organizar os equipamentos de acordo com o fluxo do processo, os operadores das células devem estar treinados para operar diferentes tipos de equipamentos. Nas células de fabricação, os operadores podem estar dedicados a um determinado equipamento ou tarefa de modo permanente. Outra forma de organizar o trabalho é atribuir a cada operador a responsabilidade por mais de um equipamento ou tarefa. Neste caso, eles trabalham em pé e caminhando, passando de máquina em máquina descarregando e carregando as peças em processamento. Esta última forma de organização do trabalho exige que os operadores das células sejam multifuncionais, ou seja, treinados para realizar operações distintas (BLACK, 2007; HYER; WEMMERLÖV, 2002; PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM, 1999; BLACK, 1991; MONDEN, 1984). Nas células de montagem, geralmente, não ocorrem os ciclos automáticos dos equipamentos, pois as atividades são predominantemente manuais. Apesar desta diferença, seu funcionamento é semelhante: os operadores deslocam-se de posto em posto, porém permanecem neste durante a realização das atividades (BLACK, 1991).

Dentro das células, utiliza-se o fluxo contínuo, onde os produtos são movidos através do processo de manufatura uma unidade por vez, na taxa determinada pelas necessidades do cliente (ROTHER; HARRIS, 2002; PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM, 1999; BLACK, 1991). Uma vez a cada tempo de ciclo, um produto atinge o fim da linha e outro entra na célula e inicia o processo, nenhum material entra na célula a menos que outro tenha saído. Ainda, existe no máximo uma unidade em processamento em cada estação de trabalho, eliminando os estoques dentro da célula e preservando o espaço. Eliminado os estoques dentro das células, a identificação de problemas no processo fica facilitada, pois o atraso de um dos operadores é rapidamente percebido pelos demais. Isto incentiva o auxílio mútuo na resolução de problemas e evidencia as necessidades de melhorias (MILTENBURG, 2001a; MONDEN, 1984).

A obtenção deste controle sobre a quantidade de material na célula é facilitada pelo uso do *layout* em U, pois neste *layout* o mesmo operador pode supervisionar a entrada e a saída da célula. A disposição dos equipamentos em forma de U diminui o deslocamento do

operador, pois a forma em U possui o fim do processo próximo ao início (BLACK, 2007; MILTENBURG, 2001a; PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM, 1999; BLACK, 1991; MONDEN, 1984).

Quando dois ou mais operadores são treinados para a mesma tarefa permite-se que sejam realizadas rotações entre operadores, substituições em casos de absenteísmo e folgas para treinamento. O supervisor da célula também deve estar habilitado para realizar qualquer tarefa na célula, pois assim este pode permitir o descanso de um operador ou substituí-lo durante a troca de postos entre dois operadores (BLACK, 2007; HYER; WEMMERLÖV, 2002; PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM, 1999; BLACK, 1991; MONDEN, 1984).

De acordo com Monden (1984), para compreender claramente o funcionamento de uma célula, deve-se ter em mente que a seqüência de operações realizada pelos operadores pode ser distinta do roteiro de fabricação do produto. Um exemplo desta natureza é apresentado em Black (1991), onde a mesma célula apresenta o operador movendo-se no mesmo sentido do produto, representado na Figura 5. E o operador movendo-se no sentido

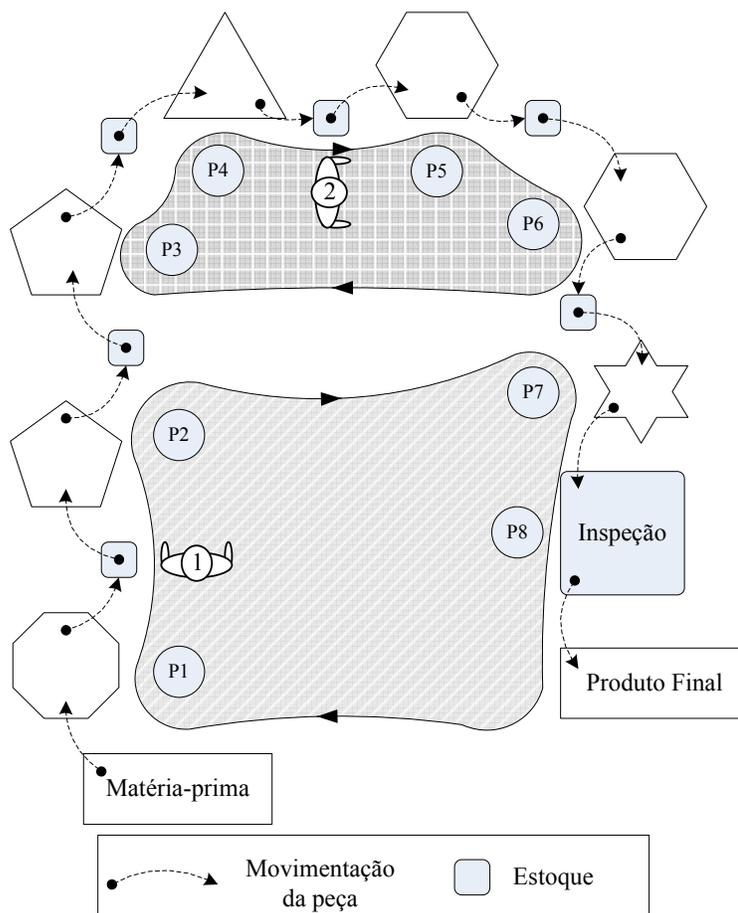


Figura 5: Movimentação dos operadores no sentido do produto.  
Fonte: adaptado de Black (1991, p. 68).

contrário, ver Figura 6. Segundo o autor, para que os operadores possam deslocar-se em sentido contrário ao do produto utiliza-se um estoque entre as operações, que contém uma peça processada e inspecionada pronta para ser passada para o próximo equipamento. Assim, o operador ao chegar no posto, este retira a peça pronta e coloca no estoque seguinte, pega a peça do estoque anterior e coloca no equipamento para ser processada. Após estas tarefas, este segue para o equipamento anterior.

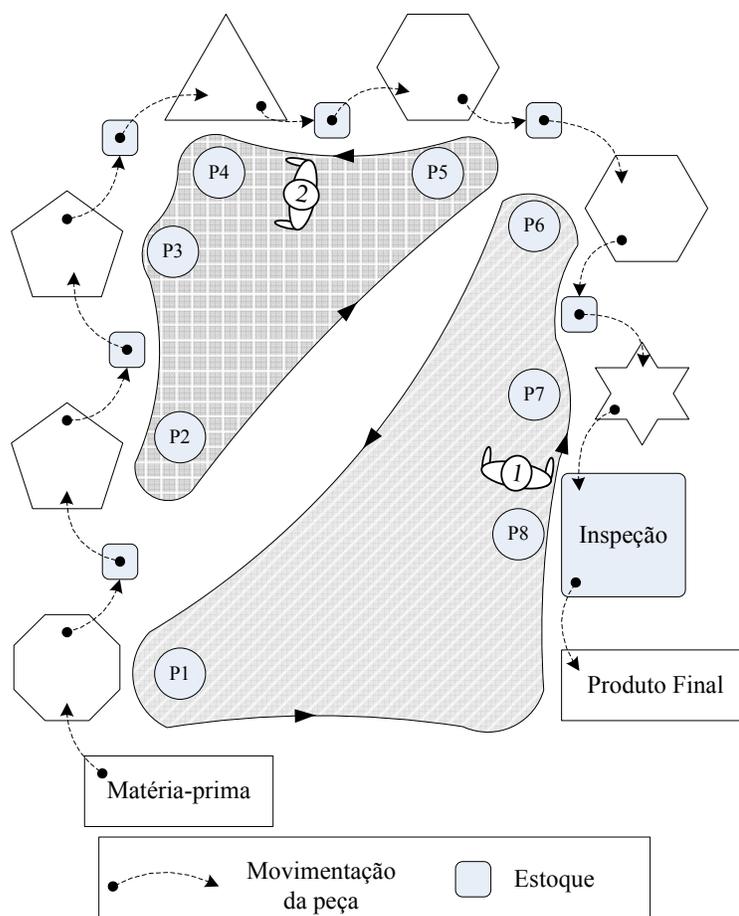


Figura 6: Movimentação dos operadores no sentido contrário ao do produto.  
Fonte: adaptado de Black (1991, p. 69).

O trabalho dos operadores é documentado na folha de rotina de operações padronizadas, que descreve a relação entre o trabalho manual realizado pelo operador, o trabalho dos equipamentos e os deslocamentos do operador. Este documento visa definir a seqüência de atividades que cada operador deve executar dentro do *takt time* (BLACK, 1991; MONDEN, 1984). Um exemplo de folha de rotina de operações padronizadas é apresentado na Figura 7.

No do Item	3561	Folha de Rotina de Operações Padronizada			Data	/ /	Quantidade necessária	480 unidades	Op. Manual	—				
	Nome do Processo				Usingem: Peça 2	Tempo de Ciclo	60"	Op. Mecânica	- - - -	Andando	~			
Seqüência das operações	Nome das Operações	Tempo			Tempo de operação									
		Manual	Máquina	Caminhar	6"	12"	18"	24"	30"	36"	42"	48"	54"	60"
1	Apanhar o material no palet	2"	-	2"										
2	Furar Centro	6"	40"	2"										
3	Chanfrar	8"	45"	2"										
4	Mandrilar	6"	42"	2"										
5	Mandrilar	7"	39"	2"										
6	Lavar, colocar o bocal e colocar no palet	12"	-	4"										
7														
8														
9														
10														
11														
<b>Total</b>		41"	166"	14"										

Figura 7: Exemplo de folha de Rotina de Operações Padronizada.  
 Fonte: adaptado de Monden (1984, p. 52).

Quanto ao balanceamento das atividades entre operadores, a opção adotada nas células é apresentada na Figura 8 (i), em contraposição a distribuição adotada nas linhas de montagem, apresentada na Figura 8 (ii). Nas células, a quantidade de trabalho necessária para fabricar uma peça é distribuída de modo a concentrar toda a espera em um operador. Os demais operadores devem ter seu tempo de ciclo meta totalmente preenchido. Isto visa evidenciar as perdas no processo e facilitar a ocorrência de melhorias (ROTHER; HARRIS, 2002; MONDEN, 1984).

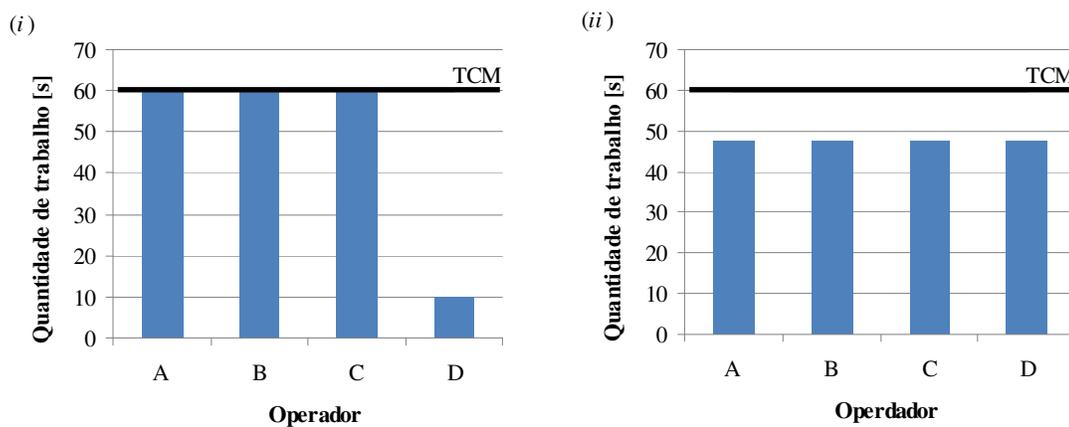


Figura 8: Balanceamento da quantidade de trabalho para fabricar uma peça: (a) célula, (b) linha.  
Fonte: adaptado de Rother e Harris (2002 , p. 54).

Entre os estudos relacionados aos operadores em ambientes celulares, o processo de alocação de atividades aos operadores apresenta-se como um dos mais populares na literatura. Segundo Shewshuk (2008), este processo de alocação diferencia-se do tradicional balanceamento de linha, onde as atividades devem ser alocadas em postos de trabalho fixos. Segundo o autor, na alocação em células, o que deve ser definido são quais os equipamentos operados por cada trabalhador, onde tais equipamentos estão fixos e o operador é quem se desloca para atendê-los. Em seu trabalho, o autor apresenta um modelo matemático para minimizar o número de operadores e concentrar a espera em um único operador, gerando a oportunidade de eliminá-lo a partir de melhorias no processo. Neste modelo o tempo de caminhada é considerado e todo equipamento pode ser alocado a qualquer operador desde que estes não cruzem o caminho um do outro. Já Nakade e Nishiwaki (2008) abordam o problema de alocação considerando operadores multi-funcionais heterogêneos, onde cada operador possui habilidades distintas. Sob estas condições é buscado minimizar o tempo de ciclo da célula com o menor número de operadores que satisfaça a demanda. Nesta modelagem são considerados tempos de operação e deslocamento determinísticos. Nestes trabalhos observa-

se a preocupação dos autores em representar o tempo de deslocamento dos operadores, julgado fundamental para uma correta representação do sistema.

Ertay e Ruan (2005) utilizaram análise envoltória de dados (DEA) para avaliar a alocação dos operadores em um sistema de manufatura celular. Os autores determinaram o número de operadores mais eficiente considerando o *lead time* médio e a utilização média dos operadores, obtidos através de simulações. Em Cesaní e Steudel (2005), as empresas observadas não utilizavam um processo formal para a alocação de operadores. Este processo era conduzido por pessoas com experiência na célula e envolviam um processo de tentativa e erro. Os gestores de tais empresas declaram interesse em um guia para o processo de alocação, pois muitas vezes os supervisores e operadores discordavam sobre a melhor estratégia. Ainda, foi relatado que muitas vezes não era possível medir os resultados com o treinamento dos operadores em mais de um equipamento da célula, tornando o processo de treinamento relativamente arbitrário. Neste trabalho os autores investigam o impacto de diferentes estratégias de alocação dos operadores. Como resultado foi observado que o balanceamento da carga de trabalho entre operadores e o nível de trabalho compartilhado entre eles são fatores significativos na performance do sistema.

Visando complementar os estudos de alocação de operadores, trabalhos voltados para a orientação do treinamento também são observados na literatura. Askin e Huang (2001) apresentam um modelo para orientar o processo de treinamento e alocação de operadores. Neste processo são consideradas habilidades técnicas e administrativas, visando obter maior sinergia do time alocado a célula. Slomp, Bokhorst e Molleman (2005) apresentam um modelo matemático para selecionar quais operadores devem ser treinados em quais equipamentos. Segundo os autores, desse modo é possível balancear a carga de trabalho entre os operadores com os menores custos de treinamento.

A seguir são apresentados alguns dados referentes ao número de operadores presentes em células, com base nos estudos de Wemmerlöv e Johnson (2000) sobre 126 células observadas. Com relação ao número de operadores por célula, os autores obtiveram que: 27% das células possuíam um único operador, 57% das células possuíam três operadores ou menos e 72% das células possuíam cinco operadores ou menos. Estes resultados são apresentados na Figura 9, observando-se que mais de 50% das células observadas possuíam três operadores ou menos. De modo geral, segundo os autores, células voltadas à fabricação possuem um número menor de operadores do que células que predominantemente realizam outras operações, como montagem, acabamento e embalagem.

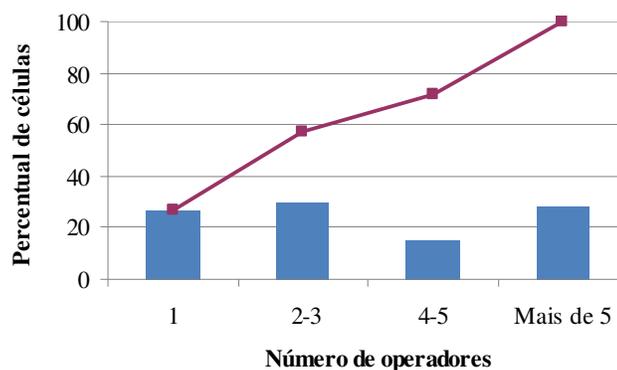


Figura 9: Número de operadores por célula.  
 Fonte: adaptado de Wemmerlöv e Johnson (2000 , p. 497).

### 2.1.8 Mudanças no número de operadores

Uma importante característica das células é a flexibilidade em ajustar sua produção às variações na demanda do cliente (MILTENBURG, 2001b). Segundo Rother e Harris (2002) pequenas flutuações diárias são melhor tratadas com um estoque de produtos acabados. Porém, eventualmente, a demanda média do cliente irá mudar e a célula precisará se adaptar. Pequenas variações podem ser contidas com o uso de horas extras e alterações mais significativas necessitarão da alteração no número de operadores.

No contexto das células, a produtividade por operador é projetada para ser constante, independentemente do volume de produção (BLACK, 2007; BALLÉ; BALLÉ, 2005; ROTHER; HARRIS, 2002). Isto equivale a dizer que se dois operadores produzem 50 peças/hora em uma célula, três operadores irão produzir 75 peças/hora, mantendo constante a produção de 25 peças/hora por operador. Rother e Harris (2002) denominam este fenômeno de “linearidade da mão-de-obra”. Ballé e Ballé (2005) reforçam a importância desta flexibilidade da mão-de-obra, pois quando ocorrem reduções na demanda, os custos de mão-de-obra permanecerão constantes.

Black e Schroer (1993) analisam o impacto da alteração no número de operadores em uma célula de fabricação de artigos para vestuário. Neste caso, obteve-se um aumento linear na produção em função do número de operadores até atingir certo limite, relacionado à operação de maior duração. Ainda, neste caso foi observada a capacidade dos operadores acomodarem tempos de processamento bastante distintos entre os postos de trabalho, assim como a variabilidade natural das atividades.

Segundo Monden (1984), existem três fatores que devem ser observados para que se obtenha esta flexibilidade no atendimento a demanda: *layout* adequado dos equipamentos, operadores multifuncionais e revisões periódicas das rotinas de operações padronizadas. Para que se possa aumentar ou diminuir o número de operadores periodicamente, é recomendado que os equipamentos estejam dispostos em forma de U. Neste arranjo o número de opções para redistribuir as atividades é maior, quando comparado com o arranjo em linha (NAKADE; NISHIWAKI, 2008; ROTHER; HARRIS, 2002; MONDEN, 1984). O balanceamento das linhas de montagem ocorre ao alocar as atividades aos postos de trabalho, onde um operador será alocado para realizar tais atividades. Com a mudança da demanda, estas atividades devem ser redistribuídas entre os postos. Nas células, o processo de alocação das atividades é diferente. Neste caso, cada atividade é realizada em um local fixo e o operador desloca-se até o posto para realizá-la. Cada operador é responsável por atender mais de um posto, e o problema de balanceamento torna-se um problema de alocação dos operadores às atividades de cada posto (SHEWSHUK, 2008). Nota-se que neste segundo caso é mais fácil atender as variações da demanda, pois o balanceamento ocorre nos operadores e não nos postos de trabalho, bastando alterar o número de operadores e a seqüência dos postos visitados pelos operadores para alterar o tempo de ciclo da célula (BLACK, 2007). Quando associado ao *layout* em U, o número de possíveis rotas para os operadores aumenta pois o operador, além dos postos laterais, pode deslocar-se para o outro lado da célula.

Como abordado na seção anterior, o trabalho em células necessita de operadores multifuncionais. Esta capacidade de lidar com operações distintas deve ir além das operações contidas no trabalho padrão do operador. Os operadores devem ser treinados para executar qualquer operação da célula, permitindo o auxílio mútuo entre os operadores. Ainda, o treinamento em operações de células distintas permitirá deslocar operadores entre células, viabilizando o ajuste da produção através da alteração no número de operadores alocados às células. Esta flexibilidade da mão-de-obra é obtida através da rotação do trabalho, transferindo o operador para diferentes postos do seu setor de trabalho, de acordo com um planejamento pré-estabelecido (MONDEN, 1984).

Segundo Miltenburg (2001b) e Monden (1984), maiores ganhos de flexibilidade podem ser obtidos tratando-se as células como blocos em estruturas mais complexas, por permitir que os operadores atuem em células distintas. O exemplo da Figura 10, adaptados de Miltenburg (2001b), representa uma possível estruturas para fabricação de cinco produtos. Tais estruturas visam aumentar o número de possibilidades na combinação de tarefas para cada operador.

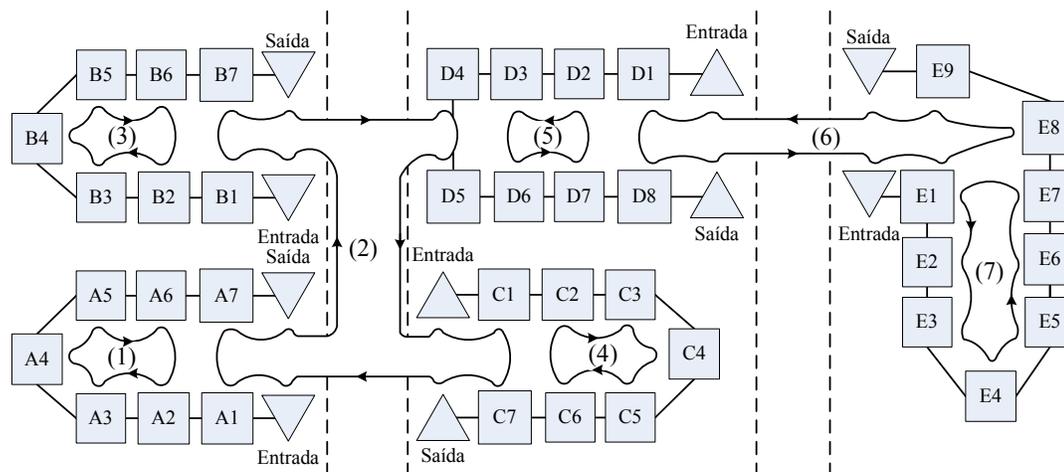


Figura 10: Células como blocos de estruturas mais complexas.  
 Fonte: adaptado de Miltenburg (2001b, p. 206).

### 2.1.9 Estudos com simulação de células

A maior parte da literatura encontrada sobre a modelagem e simulação de células de manufatura está focada na comparação entre o *layout* funcional e o *layout* celular. Entre estes trabalhos estão: Ekren e Ornek (2008), Pitchuka, Adil e Ananthakumar (2006), Djassemi (2005), Li (2005), Yazici (2005), Shafer e Charnes (1995), Morris e Tersine (1994), Suresh e Meredith (1994), Burgess, Morgan e Vollmann (1993) e Garza e Smunt (1991). Como característica comum entre estes trabalhos está a busca por delimitar as situações em que um *layout* é mais apropriado do que o outro. Basicamente, nos trabalhos com este enfoque objetiva-se compensar a perda de flexibilidade, ocasionada pela alocação dos recursos às células, através da diminuição do tempo de setup e das distâncias e tempos de movimentação, por exemplo. Os trabalhos de Chtourou, Jerbi e Maalej (2008), Agarwal e Sarkis (1998) e Johnson e Wemmerlöv (1996) revisam este assunto e podem ser consultados para obter maiores detalhes sobre o desempenho relativo entre o layout funcional e o celular.

De modo análogo, em Johnson (2005) é abordado o processo de conversão de uma linha de montagem multi-modelo para um conjunto de células de montagem em paralelo. Assim, este estudo complementa os trabalhos acima citados, pois a comparação do *layout* por produto com o *layout* celular auxilia na delimitação do outro extremo de aplicação da manufatura celular.

Ainda, alguns estudos fazem uso da simulação como ferramenta no processo de melhoria de células existentes, como por exemplo, Grimard, Marvel e Standridge (2005) e

Black e Schroer (1993). Diferentemente dos anteriores, estes estudos estão focados na representação e análise de apenas uma célula, enquanto os outros visam analisar o sistema produtivo de modo amplo, englobando mais de uma célula.

A análise do desempenho da célula na presença de equipamentos sujeitos a falhas também motiva o uso da simulação. Como exemplo, Elleuch et al. (2008) sugere que a partir da falha de um dos equipamentos, os produtos da célula passem a utilizar um equipamento semelhante de outra célula. Para analisar esta opção, os autores apresentam um modelo baseado em cadeias de Markov, cujos resultados são corroborados pelo uso da simulação.

## **2.2 Simulação**

Na seção anterior foram apresentados o conceito de célula, seu contexto e características. Agora, apresenta-se a simulação, ferramenta utilizada no desenvolvimento deste estudo. A evolução da computação, ocorrida nas últimas décadas, permitiu o desenvolvimento e difusão da simulação em diversas áreas e com diferentes finalidades (HOLLOCKS, 2006; ROBINSON, 2005; NANCE; SARGENT, 2002). Como evidências da aceitação das técnicas de simulação têm-se o estudo de Lane, Mansour e Harpell (1993), realizado no período de 1973 a 1988, onde constataram que a simulação estava entre as três técnicas mais importantes dentro do campo da pesquisa operacional. Ainda, em outro estudo, analisando 1294 artigos no período de 1970 a 1992, Gupta (1997) observou que a simulação, entre treze assuntos de pesquisa operacional considerados, era a segunda a receber mais atenção.

A partir da necessidade de estudar um sistema real, deve-se escolher adequadamente uma abordagem para tal estudo, conforme Figura 11. Segundo Law (2007), a primeira abordagem possível é realizar experimentos com o sistema, alterando-o fisicamente. Deste modo, não existem dúvidas a respeito da validade dos resultados do estudo, mas casos em que a alteração do sistema real possua viabilidade e custos aceitáveis são raros. Assim, a alternativa a ser utilizada é a construção de um modelo deste sistema. Nestes casos, entretanto, sempre existirá a questão da representatividade do modelo e sua validade no auxílio à tomada de decisão. Ainda, segundo o autor, os modelos construídos para representar o sistema real podem ser classificados em modelos físicos, como, por exemplo, miniaturas de carros para testes em túneis de vento, e modelos matemáticos. Nos modelos matemáticos, o grau de complexidade do modelo determinará como este será utilizado para obter informações a respeito do sistema que ele representa. Modelos simples, em que seja possível trabalhar com

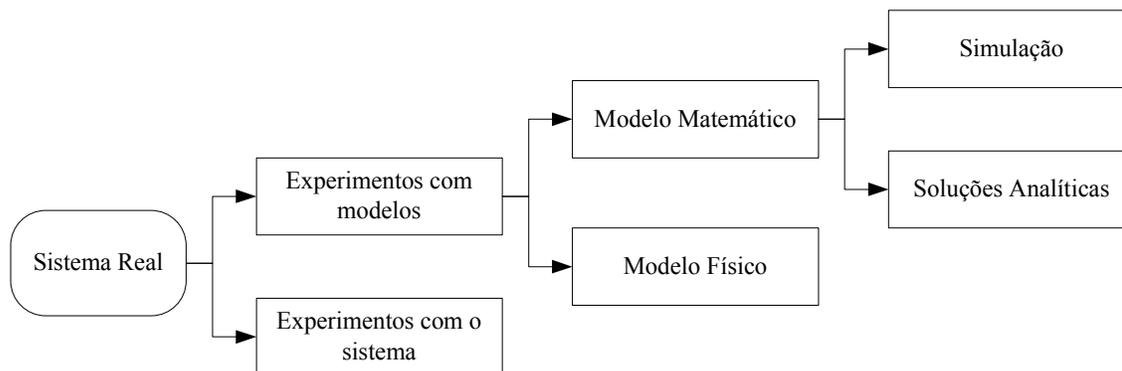


Figura 11: Formas de estudar um sistema real.  
 Fonte: adaptado de Law (2007, p.4).

as relações e quantidades de modo exato, são ditos de solução analítica e, sempre que esta se apresentar viável deve ser adotada. Por outro lado, alguns sistemas possuem elevado grau de complexidade, não sendo possível trabalhar com seus respectivos modelos de modo analítico. Neste caso, o modelo deve ser trabalhado através da simulação, alterando as entradas do sistema para observar como são afetadas as medidas de desempenho do sistema (LAW, 2007).

### 2.2.1 Sistemas, modelos e simulação

Conforme exposto, a necessidade da simulação surge a partir do interesse em um sistema do mundo real. Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou entidades que interagem e que atuam integradamente para atingir determinado objetivo (SCHIMIDT; TAYLOR, 1970<sup>1</sup> *apud* LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996; TURNER et al., 1993). De forma mais abrangente, o sistema em estudo representa a fonte de dados, podendo ser um sistema real, um sistema proposto ou uma política vigente a ser modelada (SARGENT, 2005; ZEIGLER, 1976). Dentro do campo da engenharia de produção, alguns exemplos destes sistemas são instalações fabris inteiras, processos e atividades.

O segundo elemento fundamental de uma simulação é o modelo (ZEIGLER, 1976). Para que seja possível simular determinado sistema é necessário realizar um conjunto de suposições a respeito de como este sistema funciona, geralmente através de relações lógicas ou matemáticas. Este conjunto de suposições constitui o modelo utilizado para representar o sistema em estudo (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

<sup>1</sup> SCHIMIDT, J.W.; TAYLOR, R.E. **Simulation and analysis of industrial systems**. Homewood: Richard D. Irwin, 1970.

O terceiro e último elemento necessário é denominado computador: homem ou máquina capaz de gerar dados que representem o comportamento do modelo através de suas instruções (ZEIGLER, 1976). Na simulação, o modelo simulado é analisado através de métodos numéricos ao invés de métodos analíticos. Assim, a simulação, conceitualmente, pode ser realizada através de cálculos manuais, entretanto, devido ao elevado número de operações, é recomendado que seu desenvolvimento seja realizado com uso de um computador digital (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

Desses três elementos, (a) sistema, (b) modelo e (c) computador, surgem duas relações: a relação de modelagem, entre o sistema do mundo real e o modelo; e a relação de simulação, entre o modelo e o computador, ilustrados na Figura 12. A modelagem preocupa-se com o quão bem o modelo representa o mundo real tendo em vista determinado objetivo (ZEIGLER, 1976). Este conceito aplica-se a qualquer uma das formas de modelagem do sistema real discutidas anteriormente, e apresentados na Figura 11, sejam eles físicos ou matemáticos. Diferentemente, simulação é uma forma particular de interagir com o modelo. Por simulação entende-se o processo que, utilizando métodos numéricos, estima valores para as características do modelo. Então, podem ser observados os resultados e o comportamento do sistema. Dito de outra forma, na simulação utiliza-se um computador para avaliar o modelo numericamente, e os resultados deste processo são coletados com vistas a estimar corretamente determinada característica do modelo (LAW, 2007).

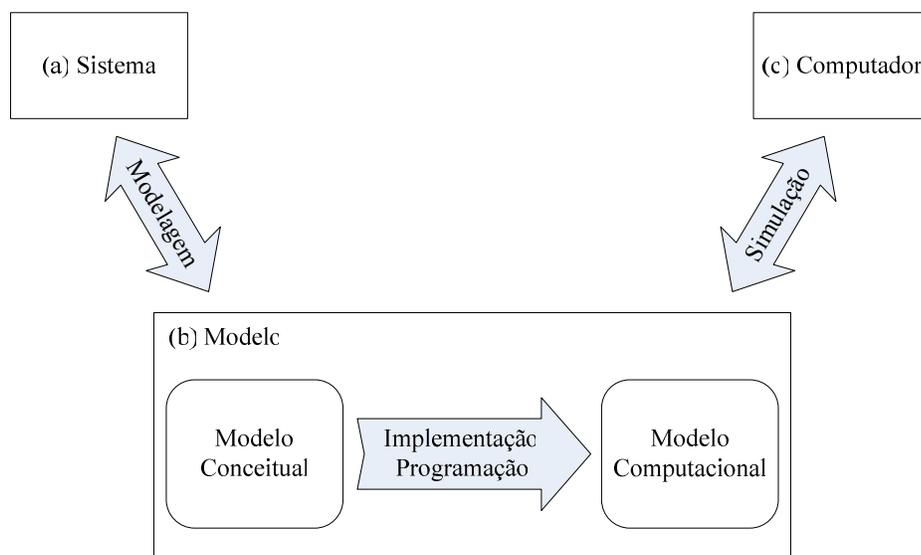


Figura 12: Modelagem e simulação.

Fonte: elaborado a partir de Sargent (2005, p. 132) e Zeigler (1976, p. 4).

Os aspectos citados podem ser percebidos nas definições propostas para simulação. De forma ampla, Law (2007) define simulação como a arte de representar o comportamento de sistemas do mundo real. Já Zeigler (1976) utiliza o termo modelagem e simulação, referindo-se ao complexo de atividades associadas à construção de modelos de sistemas do mundo real e sua simulação em um computador.

A estrutura do elemento (b) modelo pode ser complementada com base em Sargent (2005), que faz distinção entre o modelo conceitual e o modelo computacional. Segundo o autor, o modelo conceitual é a representação matemática, lógica ou verbal do sistema desenvolvida para determinado estudo. Diferentemente, o modelo computacional é o conjunto de instruções passadas ao computador, obtido através da programação do modelo conceitual. Portanto, um modelo utilizado com fins de simulação é composto pelos dois tipos de modelos citados, sendo o processo de implementação ou programação computacional a conexão entre eles, também representados na Figura 12 como a estrutura interna do elemento (b) modelo.

A seguir é apresentada a classificação dos modelos de simulação. A partir da identificação do tipo de modelo de simulação utilizado neste trabalho será apresentada uma definição específica para este tipo de modelo.

### 2.2.2 Classificação dos modelos de simulação

Dado um modelo matemático a ser estudado por meio de simulação, existem diversas formas de efetivar este estudo. Para compreender melhor esta divisão, três dimensões nas quais os modelos de simulação podem ser classificados são apresentadas. Esta divisão está baseada em Law (2007) e Banks, Carson e Nelson (1996):

- a) Modelos de simulação estáticos e dinâmicos: quando um modelo representa um sistema em um dado momento no tempo ou um sistema em que o tempo não possui influência, este modelo é dito estático. Por outro lado, quando este modelo representa a evolução de um sistema ao longo do tempo, este sistema é dito dinâmico.
- b) Modelos de simulação determinísticos e estocásticos: modelos de simulação que não contém nenhum elemento probabilístico, ou aleatoriedade, são chamados de determinísticos. Já os modelos que possuem alguma incerteza na forma de aleatoriedades, usando, portanto, elementos probabilísticos, são chamados de modelos de simulação estocásticos.

- c) Modelos de simulação contínuos e discretos: quando as mudanças no estado do modelo ocorrem instantaneamente e em momentos específicos no tempo, este modelo é chamado modelo discreto. Quando estas mudanças ocorrem a todo instante, de forma contínua ao longo do tempo, este modelo é dito contínuo.

Os modelos considerados neste trabalho são modelos de simulação dinâmicos, estocásticos e discretos, também chamados de modelos de simulação a eventos discretos (LAW, 2007). Para Law (2007), simulação a eventos discretos trata da modelagem de um sistema enquanto ele evolui ao longo do tempo através de uma representação em que as variáveis de estado são alteradas instantaneamente em pontos distintos no tempo. Neste caso, as variáveis de estado são um conjunto de variáveis que descrevem o sistema em um instante particular. Os pontos no tempo, aos quais o autor se refere, são aqueles em que ocorre um evento, definido como uma ocorrência instantânea que pode ou não mudar o estado do sistema. A definição proposta por Banks, Carson e Nelson (1996) é muito semelhante, onde simulação a eventos discretos é a modelagem de sistemas em que as variáveis de estado mudam somente em um conjunto discreto de pontos no tempo. Por comodidade e simplificação da redação, a partir deste ponto, quando se fizer referência ao termo simulação estar-se-á fazendo referência a modelos de simulação a eventos discretos.

### 2.2.3. Mecanismo de avanço do tempo

Para representar a natureza dinâmica deste tipo de simulação é necessário um mecanismo de avanço do tempo de simulação capaz de sincronizar a ocorrência dos eventos. Com este fim, dois métodos são encontrados na literatura: avanço do tempo a incrementos fixos e avanço do tempo a incrementos variáveis. No primeiro método, o tempo da simulação é incrementado em uma quantia fixa de tempo ( $dt$ ), escolhida apropriadamente. A cada incremento são verificados quais os eventos que possuíam ocorrência prevista para o intervalo de tempo  $dt$  já transcorrido. Então, apenas no final do intervalo  $dt$ , estes eventos alteram o estado do sistema (LAW, 2007).

O uso do método de avanço do tempo a incrementos variáveis possui o avanço do tempo condicionado a ocorrência de um evento, que define, assim, o valor do incremento no tempo da simulação. Neste método, o tempo de simulação avança evento a evento e requer uma rotina para a manipulação desta lista de eventos, capaz de inserir, reordenar e apagar

eventos. A eficiência desta rotina possui impacto significativo no tempo de execução do modelo simulado (NANCE; SARGENT, 2002; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

Na década de 60, a comparação do desempenho entre estes dois métodos motivou diversos estudos. Já na década de 70 e início dos anos 80, o foco das pesquisas voltou-se para o desenvolvimento das rotinas de manipulação de eventos (NANCE; SARGENT, 2002). Atualmente, segundo Law (2007), o método de avanço do tempo a incrementos variáveis é utilizado pela maioria dos softwares de simulação.

#### 2.2.4 Geradores de Números Aleatórios – GNA

Uma das características da simulação é a representação da aleatoriedade inerente aos eventos modelados. Nos simuladores, tal característica é obtida a partir dos geradores de números aleatórios (GNAs). Os GNAs utilizam métodos matemáticos para gerar conjuntos de números cuja distribuição se assemelha a uma distribuição uniforme entre zero e um,  $U(0, 1)$ . Através destes valores é possível gerar qualquer distribuição de probabilidade, ou seja, é possível obter um conjunto de números que em conjunto representem uma amostra cujo comportamento é representativo de uma distribuição em particular, como triangular, normal ou exponencial, entre outras. (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

Os valores produzidos pelos GNAs também são conhecidos como pseudo-aleatórios, pois a seqüência de valores é previamente conhecida (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996). Entretanto, Law (2007) argumenta que, se projetados cuidadosamente, os GNAs podem produzir número que parecem ser independentemente retirados de uma distribuição  $U(0,1)$ , já que eles passam numa série de testes estatísticos que asseguram a uniformidade e independência dos valores gerados.

Os GNAs devem atender ainda critérios de ordem prática, relacionados à sua implementação computacional. Tais geradores devem ser rápidos e evitar grandes espaços de armazenagem. Também devem permitir obter seqüências independentes de números aleatórios. Uma seqüência é um subsegmento dos números produzidos pelo gerador, com o início de uma seqüência iniciando no fim de outra. Cada uma destas seqüências deve possuir um ciclo longo. O comprimento do ciclo, ou período, representa a quantidade de números aleatórios contida na seqüência. Dessa forma, se uma quantidade  $n$  de eventos deve ser gerada, o período da seqüência utilizada não deve ser inferior a  $n$  (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

### 2.2.5 Aplicabilidade da simulação

A correta avaliação sobre a aplicabilidade da simulação é um ponto fundamental para o sucesso de um estudo com simulação, pois a simulação nem sempre é a ferramenta adequada para a solução de determinado problema (BANKS; GIBSON, 1997). Uma das situações favoráveis à aplicação da simulação ocorre em circunstâncias onde um sistema deve ser projetado. Neste caso, estimar corretamente o desempenho deste sistema, ainda inexistente, aumenta as chances de sucesso do projeto. Para tanto, a simulação permite não apenas representar o sistema futuro e seu desempenho, mas também permite avaliar diferentes condições de operação para este sistema e compreender o efeito de tais modificações. Neste caso, é possível comparar alternativas sob diversos aspectos sem comprometer recursos na aquisição de equipamentos, economizando ainda gastos com possíveis alterações e correções posteriores (LAW, 2007; BANKS, 1998).

Quando projetadas para o treinamento de pessoas, tornam-se um facilitador do aprendizado, permitindo transmitir rapidamente informações entre pessoas de diferentes contextos. Com este objetivo, esta ferramenta pode auxiliar no entendimento de certos fenômenos através da construção de cenários e análise detalhada das condições nas quais os fenômenos ocorrem. Ainda, pode expor as conseqüências de determinadas ações, permitindo o aprendizado sem interferir no funcionamento do sistema real (BANKS, 1998).

Em contraposição aos aspectos citados, a simulação também pode apresentar algumas desvantagens, ou situações desfavoráveis a sua aplicação. O desenvolvimento de modelos de simulação exige qualificação específica para esta atividade, pois os resultados apresentados podem ser de difícil interpretação. Ainda, tal desenvolvimento exige tempo e requer disponibilidade de dados. Em certos casos, a necessidade de resultados rápidos inviabiliza o uso da simulação, assim como a dificuldade na obtenção dos dados que definirão os parâmetros do sistema. Outro aspecto, com relação ao desenvolvimento de modelos de simulação, é o custo associado a este desenvolvimento que, em alguns casos, pode ser significativo (BANKS, 1998; BANKS; GIBSON, 1997).

Como será apresentado no item 2.2.6.9, cada rodada de um modelo de simulação estocástico é apenas uma estimativa do comportamento do sistema para um conjunto de entradas. Logo, um conjunto de rodadas independentes é necessário para cada conjunto de entradas do modelo. Isto prejudica o uso da simulação associado às heurísticas de otimização, sendo seu uso mais apropriado para a comparação de um número restrito de possibilidades (LAW, 2007; BANKS; GIBSON, 1997).

Por fim, a facilidade com que se atribui credibilidade aos modelos de simulação pode conduzir a decisões equivocadas, devido ao grande volume de dados gerados e pelas animações gráficas. Deve-se lembrar que tais características não garantem a validade do modelo (LAW, 2007; BANKS; GIBSON, 1997).

#### 2.2.6 Passos em um estudo com simulação

Para que um estudo com simulação seja bem sucedido, este deve ser conduzido segundo um conjunto de critérios. Este conjunto de recomendações a respeito da condução de estudos com simulação é apresentado nesta subseção. A estrutura adotada para a apresentação dos passos em um estudo com simulação é a utilizada por Law (2007), cujo fluxograma é apresentado na Figura 13. Estruturas semelhantes podem ser encontradas em Law (2006), Balci (1998) e Banks, Carson e Nelson (1996). Cabe ressaltar que apesar da representação da Figura 13 sugerir um processo seqüencial, o desenvolvimento de um estudo com simulação é dinâmico e muitas vezes requer o retorno a passos anteriores antes de prosseguir (LAW, 2007).

##### 2.2.6.1 Primeiro Passo: formular o problema e planejar o estudo

O primeiro passo consiste no processo de formulação do problema. Quando o problema a ser analisado surge num contexto empresarial, seu enunciado inicial pode conter equívocos ou não estar claramente definido. Assim, exige-se um ou mais encontros com gerentes de projeto, analistas de simulação ou especialistas de algumas áreas para a correta definição do problema (LAW, 2007). Segundo Balci (1998), a formulação do problema é o processo que permite transformar o problema enunciado em um problema suficientemente formulado para permitir o início de um estudo. Apesar deste cuidado inicial é possível que posteriormente surja a necessidade de reformular o problema (BANKS; CARSON; NELSON, 1996). Pidd (2004) afirma que este processo de formulação é um trabalho cíclico de aprendizado sobre o problema, e que auxilia na avaliação sobre a adequação do uso da simulação na resolução do mesmo.

Após a formulação do problema, inicia-se a definição dos objetivos e um planejamento geral para o projeto de simulação. Os objetivos enunciam as questões que devem ser respondidas pelo estudo. Dentro do planejamento geral, são explicitados os vários cenários que serão investigados, as medidas de desempenho utilizadas para avaliar cenários

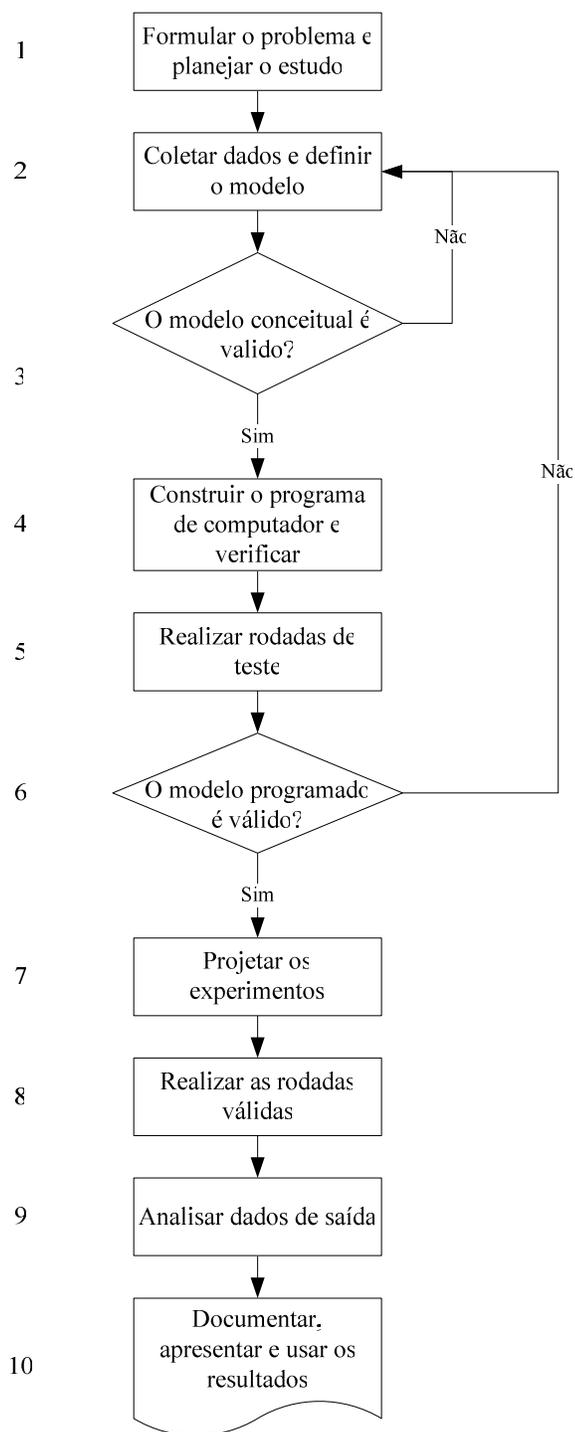


Figura 13: Passos num estudo de simulação.  
 Fonte: adaptado de Law (2007, p. 67).

distintos, assim como o tempo e recursos necessários (pessoal envolvido, *software*, etc.) na implementação do modelo. Recomenda-se a elaboração de um documento contendo o detalhamento destes aspectos (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

Nesta etapa, devem ser analisados alguns aspectos do sistema a ser modelado para o estudo. Segundo Shannon<sup>2</sup> *apud* Balci (1998), existem seis características a serem analisadas considerando os objetivos do estudo:

- a) mudanças no sistema: deve-se estimar se mudanças estruturais podem ocorrer neste sistema durante o período de estudo, pois tais mudanças podem implicar em perda de representatividade ou interesse no modelo;
- b) ambiente externo: mudanças externas podem alterar as variáveis de entrada do modelo, alterando seu comportamento e representatividade;
- c) comportamento contra-intuitivo: geralmente possuem uma relação de causa e efeito de difícil identificação, podendo ocultar um relacionamento necessário na definição do problema;
- d) deterioração da performance: esta característica deve ser incluída na formulação do problema, especialmente se o modelo for usado em previsões;
- e) interdependência e organização: a quinta e sexta características devem ser observadas para poder lidar com a complexidade do sistema real, dividindo o sistema em subsistemas menores.

#### *2.2.6.2 Segundo Passo: coletar dados e definir o modelo conceitual*

Nesta etapa é criada uma abstração do sistema real. Esta abstração é chamada de modelo conceitual, representado por relações matemáticas e lógicas a respeito da estrutura do sistema e seus componentes. A formulação deste modelo conceitual é realizada pelo modelador, que tentará capturar apenas as características do sistema essenciais na resolução do problema formulado (LAW, 2007; SARGENT, 2005; PIDD, 2004; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

Recomenda-se que o modelo seja desenvolvido gradualmente, iniciando com a construção de modelos simples e incorporando gradativamente as características necessárias para sua validação, pois para tomar decisões efetivas raramente é necessário modelar cada aspecto do sistema. Modelos extremamente detalhados podem resultar em excessivo tempo de execução, perda de prazos e ofuscamento de fatores importantes do sistema. Neste processo será necessário coletar informações a respeito da estrutura do sistema e procedimentos operacionais, nem sempre documentados pela empresa (LAW, 2007; PIDD, 2004; BANKS;

---

<sup>2</sup> SHANNON, R.E. **Systems simulation**: the art and science. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1975.

CARSON; NELSON, 1996). Estes aspectos podem ser traduzidos na relação entre a confiança no modelo e (i) custo de validação do modelo, (ii) tempo de desenvolvimento e (iii) valor do modelo para o usuário, ilustradas na Figura 14.

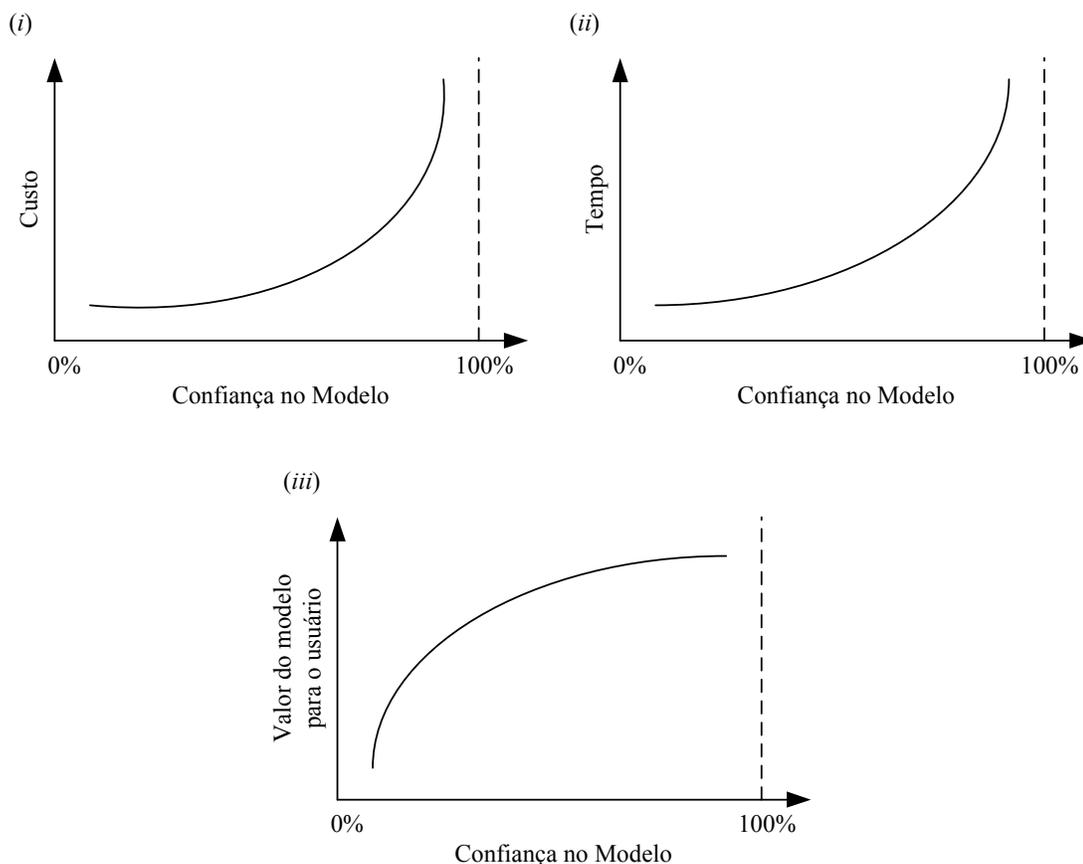


Figura 14: Relação entre a confiança no modelo e o (i) custo, (ii) tempo e (iii) valor do modelo.  
Fonte: Adaptado de Sargent (2005, p. 131).

Outra decisão importante desta etapa é a forma como a comunicação do modelo ocorrerá. Esta pode ser através de fluxogramas, diagramas e pseudocódigos. De acordo com Balci (1998), a escolha de uma destas formas de representação deve levar em conta a adequação ao sistema a ser representado, o conhecimento prévio daqueles aos quais o modelo será comunicado, a capacidade dos métodos para realizar análises e validações formais, o suporte à documentação do modelo, a manutenibilidade oferecida e a facilidade em gerar um programa computacional a partir deste modelo.

Paralelamente à elaboração do modelo, ocorrerá a coleta dos dados. Estes dados podem possuir duas finalidades: especificar parâmetros de entrada do modelo, como, por

exemplo, distribuições de probabilidade, ou validar o modelo, através da comparação com dados referentes ao desempenho do sistema existente (LAW, 2007).

De acordo com Law (2007), os dados coletados para a parametrização do sistema devem, preferencialmente, ser utilizados para ajustar uma distribuição teórica, contínua ou discreta. Caso não seja possível ajustar uma distribuição teórica aos dados, utiliza-se o recurso da definição de uma distribuição empírica. A qualidade do ajuste da distribuição teórica pode ser avaliada por testes de qualidade do ajuste, como o qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Anderson-Darling (A-D). Segundo o autor, os testes K-S e A-D apresentam certa superioridade com relação ao teste qui-quadrado. Esses testes avaliam se um determinado conjunto de dados é uma amostra independente de uma distribuição em particular ( $\hat{F}$ ). Isto é feito através de um teste de hipótese cuja hipótese nula é:

$$H_0: \text{O conjunto de dados testado segue a distribuição de probabilidade } \hat{F}. \quad (3)$$

Neste caso, espera-se não rejeitar a hipótese nula. Isto não significa que  $H_0$  seja verdadeira, deste modo, os testes são apenas uma forma de eliminar falhas grosseiras. Em sua forma original, o resultado do teste indica a diferença entre os dados e a distribuição, e deve ser comparado com valores de referência de acordo com o nível de significância desejado. Caso o resultado encontrado seja maior que o valor de referência, rejeita-se a  $H_0$  (LAW, 2007). Nos programas utilizados para realizar os testes de qualidade do ajuste, normalmente, além do resultado do teste, também é informado o valor de  $p$ . O valor de  $p$  representa o menor nível de significância que levaria à rejeição de  $H_0$ . Logo, sempre que  $p$  for maior que o nível de significância escolhido não se pode rejeitar  $H_0$  (HINES et al., 2006). Por exemplo, para um nível de significância de 0,05 (ou seja, 95% de confiança), um valor de  $p$  de 0,04 implicaria na rejeição de  $H_0$ ; e um valor de  $p$  de 0,15 levaria à não rejeição de  $H_0$ .

### *2.2.6.3 Terceiro Passo: validação do modelo conceitual*

A validação busca determinar se o modelo de simulação é suficientemente representativo do sistema com relação aos objetivos do estudo, preocupando-se com a construção do modelo correto. O grau de dificuldade na validação depende da complexidade do sistema sendo modelado e da existência ou não de um sistema similar. Como o modelo é uma abstração do sistema, o modelo simulado sempre será apenas uma representação

simplificada do sistema real, independentemente do esforço despendido na construção do modelo (LAW, 2007; CARSON, 2002; BALCI, 1998).

Esta etapa corresponde à primeira validação do modelo conceitual. Neste processo de validação, Law (2007) recomenda que uma revisão estruturada do documento conceitual seja realizada com o objetivo de assegurar que os pressupostos do modelo estão completos e corretos. Em estudos destinados à tomada de decisão em empresas, esta atividade também tem a finalidade de promover a interação entre membros do projeto e senso de posse sobre o modelo por parte dos tomadores de decisão.

#### 2.2.6.4 Quarto Passo: construir o programa computacional e verificar

Neste momento deve-se traduzir as especificações do modelo conceitual em um modelo programado. Este modelo programado é uma representação executável do modelo conceitual. A programação do modelo pode ser realizada em uma linguagem de programação (por exemplo, Pascal, Java e C++), uma linguagem de simulação (SIMAN, SIMSCRIPT e GPSS) ou um *software* de simulação (ProModel, Arena e FlexSim) (LAW, 2007; BALCI, 1998).

Antes de passar à próxima etapa, deve-se executar o processo de verificação. A verificação do modelo consiste em avaliar se o modelo foi adequadamente representado em outra forma. Por exemplo, ao avaliar a correção da transformação de um fluxograma em um programa de computador, se está realizando o processo verificação. A verificação de um modelo preocupa-se com a construção correta do modelo (LAW, 2007; CARSON, 2002; BALCI, 1998). Entretanto, esta verificação não deve ser realizada apenas ao término da programação de todo o modelo, sendo, portanto, fortemente recomendado que o processo de verificação ocorra ao longo de todo o processo de programação (LAW, 2007; BANKS, 1998).

Diferentes formas de verificação são encontradas na literatura, sendo necessário uma combinação das diferentes técnicas para prover maior grau de confiança no modelo programado. Uma forma rápida de verificação consiste em observar a animação gráfica resultante do modelo, verificando se esta possui o mesmo comportamento do sistema real. Este procedimento pode ser complementado pela observação atenta dos resultados fornecidos pelo modelo para verificar se estes correspondem aos resultados esperados. Ainda, alterando-se os parâmetros de entrada e observando a resposta do modelo tem-se um indício da coerência no comportamento do modelo em situações extremas (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

Outra forma de verificação consiste em conferir a correspondência do código do modelo programado com a definição do modelo conceitual. Além destes recursos, é recomendado na literatura que se execute o programa acompanhando a evolução da simulação evento a evento. Dessa forma, pode-se acompanhar detalhadamente a lógica implementada no modelo. Entretanto, esta forma de verificação tende a consumir mais tempo (LAW, 2007; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

#### 2.2.6.5 Quinto Passo: realizar rodadas de teste

Após a verificação do programa, um conjunto de rodadas do modelo programado deve ser realizado, visando produzir resultados para a validação do modelo programado (LAW, 2007). Cabe lembrar que caso sejam utilizadas na validação medidas referentes ao regime permanente do modelo, nesta etapa deve ser definido o período de *warm-up* a ser utilizado, para que as estimativas realizadas não contenham distorções proporcionadas pelo estado inicial. O processo de definição do período de *warm-up* é apresentado no item 2.2.6.9, junto com a descrição do processo de análise dos resultados.

Nesta etapa, o número de rodadas a ser gerada dependerá das técnicas de validação utilizadas. Algumas destas técnicas são apresentadas no próximo item.

#### 2.2.6.6 Sexto Passo: validar o modelo programado

Nesta etapa, caso exista um sistema real, devem ser realizadas comparações entre o modelo e o sistema através das medidas de desempenho coletadas do sistema no passo 2 e dos resultados obtidos no passo 5. Independentemente da existência ou não de um sistema para comparações, o analista em simulação e os especialistas devem ser consultados para realizarem possíveis correções. Ainda, deve-se fazer uso da análise de sensibilidade para determinar quais os fatores do modelo possuem um impacto significativo nas medidas de desempenho do sistema, e, portanto, devem ser modeladas com cuidado. (LAW, 2007; LAW, 2006; CARSON, 2002).

Entre os procedimentos estatísticos utilizados para comparar observações do sistema real com resultados da simulação está a construção de intervalos de confiança. Neste caso, dados  $m$  conjuntos de dados independentes do sistema real ( $S_j$ , com  $j=1, \dots, m$ ) e  $n$  conjuntos de dados independentes do modelo simulado ( $M_i$ , com  $i=1, \dots, n$ ). Dado que os  $S_j$  são independentes e identicamente distribuídos, IID, estes possuem esperança  $E(S_j) = \mu_S$ . Da

mesma forma, para os  $M_i$ , considerando que estes foram gerados por replicações independentes, tem-se  $E(M_i) = \mu_M$ . Neste caso, o intervalo de confiança  $100(1-\alpha)$  será construído para a variável  $\zeta = \mu_S - \mu_M$ . Dado um valor de  $\alpha$ , sendo  $l(\alpha)$  o limite inferior e  $u(\alpha)$  o limite superior do intervalo de confiança gerado para  $\zeta$ , tem-se as seguintes possibilidades. Caso zero pertença ao intervalo  $[l(\alpha), u(\alpha)]$ , então qualquer diferença observada entre  $\mu_S$  e  $\mu_M$  não é estatisticamente significativa ao nível  $\alpha$ , podendo ser explicada pela variação da amostra. Caso zero não pertença ao intervalo  $[l(\alpha), u(\alpha)]$ , então a diferença observada entre  $\mu_S$  e um  $\mu_M$  é estatisticamente significativa ao nível  $\alpha$ . Cabe lembrar que neste último caso, deve-se avaliar a magnitude desta diferença e seu impacto na avaliação do modelo (LAW, 2007). Maiores detalhes sobre a construção dos intervalos de confiança são apresentados no item 2.2.6.9, na comparação de cenários alternativos.

Segundo Law (2007), a construção do intervalo de confiança é preferível quando comparada com os testes de hipótese cuja hipótese nula é  $H_0: \mu_S = \mu_M$  por duas razões. Primeiro, dado que o modelo é apenas uma aproximação da realidade,  $H_0$  será falsa na maioria dos casos. Segundo, o intervalo de confiança fornece mais informação do que o teste de hipóteses, pois através do intervalo de confiança podemos conhecer a magnitude da diferença entre o modelo e o sistema.

#### *2.2.6.7 Sétimo Passo: projetar os experimentos*

Nesta etapa realiza-se o projeto dos cenários a serem simulados. É recomendado que o conjunto de cenários avaliados pela simulação seja estruturado através de um projeto de experimentos. Segundo Balci (1998), o projeto de experimentos é o processo de planejamento que visa obter a informação desejada com o menor custo, permitindo realizar inferências válidas. Para cada cenário que deve ser simulado, devem ser definidos os seguintes parâmetros: a duração de cada rodada da simulação; duração do período de *warm-up*, quando necessário; número de rodadas independentes, usando diferentes números aleatórios; e estado inicial do sistema (BANKS, 1998; LAW, 2007).

#### *2.2.6.8 Oitavo Passo: realizar as rodadas válidas*

A partir da definição dos cenários e parâmetros a serem utilizados, nesta etapa são obtidos os resultados fornecidos pelo modelo computacional, permitindo estimar as medidas

de desempenho para cada um dos cenários. Os resultados obtidos destas rodadas são analisados na etapa seguinte (LAW, 2007).

#### 2.2.6.9 Nono Passo: analisar os dados de saída

Segundo Law (2007), os dois maiores objetivos em analisar os dados de saída são: determinar a performance absoluta de certos cenários do sistema e comparar configurações alternativas para o sistema. Durante esta análise, o analista pode perceber a necessidade de obter mais rodadas ou de simular cenários adicionais (BANKS, 1998; BANKS; CARSON; NELSON, 1996).

A análise dos resultados fornecidos pela simulação deve ser conduzida apropriadamente para fornecer estimativas corretas sobre o desempenho do sistema. Um primeiro aspecto a ser abordado é a necessidade de independência entre as observações que compõem tal estimativa. Tal aspecto será discutido a seguir, com base em Law (2007).

Suponha que exista interesse na variável  $Y$ , referente, por exemplo, ao tempo de fila de  $m$  clientes em um serviço de atendimento. Para uma rodada do simulador, faça  $y_{1j}$  ser o tempo de fila do  $j$ -ésimo cliente atendido,  $j=1, 2, \dots, m$ . Logo, não se pode supor independência e nem identidade nas distribuições entre os tempos de  $y_{1j}$ . Como consequência, também não se pode supor que a média destes  $y_{1j}$ , representada por  $\hat{y}_1 = \sum_{j=1}^m y_{1j} / m$ , seja uma boa estimativa para  $Y$ .

Sabe-se que a seqüência de  $y_{1j}$  foi gerada a partir de uma seqüência de números aleatórios,  $a_1$ . Com a alteração desta seqüência,  $a_1$ , por outra seqüência de números aleatórios independentes,  $a_2$ , obtêm-se novos valores,  $y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2m}$ , e sua respectiva média  $\hat{y}_2$ . Desse modo, para  $n$  rodadas do simulador, utilizando diferentes seqüências de números aleatórios  $a_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , obtêm-se:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c} j \\ \hline 1 \quad 2 \quad \dots \quad m \end{array} \\
 \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m} : \hat{y}_1 \\ 2 \quad y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2m} : \hat{y}_2 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ n \quad y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{nm} : \hat{y}_n \end{array} \right. \quad (4)
 \end{array}$$

As observações de uma determinada replicação do simulador,  $i$  constante, não são independente e identicamente distribuídas (IID). Entretanto, entre replicações distintas,  $j$  constante, as observações são IID. Desse modo, para estimar o tempo de espera do  $j$ -ésimo cliente, pode-se utilizar como estimativa a média das replicações,  $y_{11}, y_{21}, \dots, y_{n1}$ . Da mesma forma, para estimar-se corretamente a média do tempo de espera na fila deve-se utilizar a média dos  $\hat{y}_i, i=1, 2, \dots, n$ . Entretanto, para a estimativa desta média deve-se observar um segundo aspecto, discutido a seguir.

Um modelo de simulação pode ser classificado segundo a análise dos resultados em terminal e não-terminal. Um modelo de simulação terminal possui um evento E que especifica o final de uma replicação. Nestes casos, o estado inicial do sistema deve ser representativo do sistema real, pois este geralmente terá influência no resultado da simulação. Já num modelo de simulação não-terminal, tal evento E que determina o final da replicação não ocorre. Nestes casos, geralmente existe interesse em resultados representativos do funcionamento “normal” do sistema, denominado regime permanente. Nestes casos, o estado inicial do sistema geralmente não é representativo deste estado “normal”, logo, sua influência deve ser minimizada. Desta forma, uma das alternativas é determinar um período  $l$ , chamado de *warm-up*, que será desconsiderado na análise dos resultados (LAW, 2007). Portanto, para o caso apresentado anteriormente, da estimativa do tempo de espera na fila, a média dos  $\hat{y}_i, i=1, 2, \dots, n$ , só será uma boa estimativa do comportamento do sistema caso os valores de  $y_{ij}$  sejam correspondentes ao período de regime permanente, após *warm-up*.

Entre as possíveis técnicas utilizadas para determinar o período de *warm-up*,  $l$ , está o procedimento proposto por Welch<sup>3,4</sup> *apud* Law (2007). Este procedimento é baseado em  $n$  replicações independentes do modelo e é constituído de 4 passos:

1. Faça  $n$  replicações ( $n \geq 5$ ), cada uma com tamanho  $m$  (onde  $m$  é grande). Faça  $Y_{ij}$  ser a  $j$ -ésima observação da  $i$ -ésima replicação ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ).
2. Faça  $\bar{Y}_j = \sum_{i=1}^n Y_{ij} / n$ , para  $j = 1, 2, \dots, m$ .
3. Para suavizar a oscilação de  $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots$ , (mas manter as baixas frequências de oscilação ou tendências de interesse) pode-se definir a

<sup>3</sup> WELCH, P. D. **On the problem of initial transient in steady-state simulation**. New York: IBM Watson Research Center, 1981.

<sup>4</sup> \_\_\_\_\_. The statistical analysis of the simulation results. In: LAVENBERG, S. S. (Org.) **The computer performance modeling handbook**. New York: Academic Press, 1983.

média móvel  $\bar{Y}_j(w)$ , onde  $w$  é um número inteiro positivo tal que  $w \leq m/4$ .

$$\bar{Y}_j(w) = \begin{cases} \frac{\sum_{s=-w}^w \bar{Y}_{j+s}}{2w+1} & \text{se } j = w+1, \dots, m-w \\ \frac{\sum_{s=-(j-1)}^{j-1} \bar{Y}_{j+s}}{2j-1} & \text{se } j = 1, \dots, w \end{cases}$$

4. Plotar  $\bar{Y}_j(w)$  para  $j = 1, 2, \dots, m-w$  e escolher para  $l$  um valor de  $j$  além do ponto onde  $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots$  parece ter convergido.

Para comparar cenários alternativos, Law (2007) sugere a construção de intervalos de confiança (t-pareados). Para comparar dois sistemas alternativos, devem ser gerados um conjunto de  $n$  replicações independentes para cada um dos cenários,  $X_{1u}$  e  $X_{2u}$ ,  $u = 1, 2, \dots, n$  (na validação de modelos pode-se considerar um dos cenários o próprio sistema real, com amostras independentes). Em seguida, define-se a variável  $Z_u = X_{1u} - X_{2u}$ , para  $u = 1, 2, \dots, n$ . O intervalo de confiança será construído para a variável  $Z_u$ , com  $\bar{Z}(n) = \sum_{u=1}^n Z_u / n$  e

$$\hat{\text{Var}}[\bar{Z}(n)] = \frac{\sum_{u=1}^n [Z_u - \bar{Z}(n)]^2}{n(n-1)}. \text{ Desse modo tem-se uma aproximação para o intervalo de}$$

confiança de  $100(1-\alpha)$ :

$$\bar{Z}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\hat{\text{Var}}[\bar{Z}(n)]} \quad (5)$$

Caso  $Z_u$  siga uma distribuição normal, o intervalo de confiança é exato, caso contrário, pelo teorema do limite central este terá confiança próxima de  $1-\alpha$  para  $n$  grande. É importante ressaltar que os  $X_{1u}$  e  $X_{2u}$ ,  $u = 1, 2, \dots, n$ , são variáveis aleatórias definidas para uma replicação inteira. Para o exemplo citado anteriormente,  $X_{1u}$  seria a média do tempo de atendimento para uma replicação e não o tempo de espera de um cliente.

Uma alternativa para reduzir a variabilidade, e portanto o tamanho do intervalo de confiança, é induzir uma correlação entre as variáveis  $X_{1u}$  e  $X_{2u}$ . Tal objetivo pode ser alcançado utilizando-se os mesmos números aleatórios para os dois cenários. Entretanto, para que o intervalo diminua é necessário que esta correlação seja positiva. Não existe uma regra

que garanta tal condição, sendo necessário implementá-la para confirmar a redução na variabilidade (LAW, 2007)

Em resumo, alguns equívocos a serem evitados na análise dos resultados da simulação são: realizar uma única rodada e tratar o resultado como se fosse o comportamento real do sistema, analisar os dados de saída de uma rodada com fórmulas que assumem independência e falhar ao identificar o período de aquecimento da simulação, caso o comportamento de regime permanente seja desejado (LAW, 2007; MUSSELMAN, 1998).

#### *2.2.6.10 Décimo Passo: documentar, apresentar e utilizar os resultados*

A etapa final de um estudo com simulação inicia com a consolidação de toda a documentação produzida durante este estudo. Este documento final deve conter o modelo conceitual, apresentando todos os pressupostos do modelo assumidos durante todo o estudo; os dados coletados e suas análises; os testes de validação realizados; a análise dos dados de saída e os resultados do estudo. O modelo programado também é considerado parte da documentação do estudo (LAW, 2007). Banks, Carson e Nelson (1996) reforçam a importância de realizar a documentação do estudo devido às seguintes razões: melhora o entendimento do modelo, facilita possíveis alterações, aumenta a credibilidade e auxilia na tomada de decisão.

Após a finalização da documentação, é necessário comunicar os resultados do estudo. De acordo com Law (2007), a tarefa de comunicar o modelo a gerentes e pessoas que não são familiarizadas com os detalhes do modelo é facilitada pelo uso da animação gráfica. O autor ainda discute a necessidade de promover credibilidade ao modelo, através da discussão da construção do modelo e do seu processo de validação. De forma complementar, Banks, Carson e Nelson (1996) afirmam que os resultados da análise final do estudo devem ser apresentados de forma clara e concisa, permitindo, se necessário, revisar a formulação final, as alternativas identificadas, os critérios utilizados para a comparação destas alternativas e os resultados dos experimentos.

Finalmente, como última atividade desta etapa, inicia-se o uso dos resultados do estudo. Entretanto, para Pidd (2004), o sucesso de um estudo com simulação não pode ser avaliado apenas pelo uso ou não dos resultados da análise final, assim como o uso dos resultados também não ocorre apenas em um único momento. Para o autor, existem dois tipos de resultados que um estudo de simulação pode fornecer. O primeiro, discutido acima, é caracterizado como um produto tangível, visto como um conjunto de recomendações

especificando qual ação deve ser tomada. O segundo tipo de resultado, apresentado pelo autor, é o aumento de conhecimento gerado. Este tipo de resultado geralmente ocorre em dois momentos do estudo. Primeiramente, a estruturação do problema e a modelagem revelam importantes características do sistema a ser simulado, e estas informações podem ser utilizadas imediatamente, sem esperar o término do estudo. O segundo momento em que ocorre esta aprendizagem é durante a execução do modelo programado. Neste ponto, resultados inesperados podem ocorrer, revelando, em alguns casos, que o modelo é inválido e precisa ser melhorado. Porém, comportamentos contra-intuitivos do sistema podem causar a mesma surpresa e, a partir deste momento, melhorar a percepção de todos sobre o funcionamento do sistema.

### 2.2.7 Áreas de aplicação da simulação na manufatura

Os trabalhos apresentados nesta seção representam uma amostra das muitas áreas de aplicação da simulação na manufatura. O planejamento da produção, principalmente a atividade de seqüenciamento da produção, tem se mostrado um campo fértil para utilização da simulação. Os estudos de Cao, Patterson e Bai (2005) e Cao, Patterson e Griffin (2001) investigam as políticas de seqüenciamento em ambientes onde produtos customizados são dominantes. Neste contexto, além da variabilidade natural do tempo de processamento, existe uma incerteza devido aos erros de estimativa associados ao tempo de processamento dos produtos customizados. Nestes estudos, através da simulação, foi possível avaliar o desempenho de políticas de seqüenciamento distintas com um custo significativamente menor do que experiências com o sistema real. Tsubone, Ishikawa e Yamamoto (2002) utilizaram a simulação para projetar um sistema de planejamento da produção em um ambiente produtivo onde estão presentes simultaneamente produtos sob pedido (MTO – *Make-To-Order*) e produtos para estoque (MTS – *Make-To-Stock*). Com o uso da simulação foi possível compreender a influência das variáveis de projeto do sistema na taxa de pedidos não atendidos dos produtos para estoque, relação de difícil determinação no ambiente real. Outro aspecto da programação da produção analisado na literatura via simulação é a comparação de sistemas puxados com sistemas empurrados. Entre os estudos que tratam deste aspecto estão Bhatnagar e Chandra (1994) e Sarker e Fitzsimmons (1989).

Outra área que tem motivado estudos com simulação é gestão de estoques. Duas aplicações comuns nesta área dizem respeito à definição de estoques em linhas produtivas e à definição de políticas e dimensionamento de cartões *kanban* em sistemas puxados. Os

trabalhos de Powell e Pyke (1996) e So (1990) tratam da primeira aplicação, sendo a simulação útil para investigar linhas produtivas com moderada variabilidade e apenas um gargalo (POWEL; PYKE, 1996) e os efeitos de diferentes estratégias de alocação dos estoques em linhas produtivas (SO, 1990). Na segunda aplicação, Gupta, Al-Turki e Perry (1999) sugerem uma nova metodologia para gestão de cartões *kanban* em sistemas *just-in-time* sujeitos a incertezas e interrupções não planejadas. Savsar e Al-Jawini (1995) analisam o efeito de tempos de processamento variáveis, do número de *kanbans* entre estações, da variabilidade na demanda, tamanho da linha e da política utilizada na coleta dos cartões sobre o desempenho do sistema.

A simulação também mostra-se útil na estimativa de capacidade de sistemas produtivos. No estudo de Abdul-Kader e Gharbi (2002) utiliza-se a simulação para estimar a capacidade de linhas produtivas multi-produto. Neste caso, a simulação permite a representação no modelo de fatores como quebra de equipamentos, tempo de reparo e *setups*, características difíceis de representar em modelos analíticos.

Em um contexto mais amplo, a simulação tem auxiliado em problemas relacionados à cadeia de suprimentos. Em Suwanruji e Enns (2006), é apresentado um estudo que trata da gestão de estoques em uma cadeia de suprimentos de várias camadas, com fatores estocásticos e envolvendo as funções de produção e distribuição. Oliveira e Carvalho (2004) analisam diferentes políticas de gestão em cadeias de suprimentos através de modelos de simulação.

Outra proposta para o uso da simulação é a integração com ferramentas multi-critério de apoio à decisão, como o AHP – *Analytic Hierarchy Process*. Ayağ (2007) utiliza esta integração para propor uma abordagem híbrida no processo de seleção de máquinas ferramenta. Neste caso, a simulação é utilizada primeiramente para modelar o ambiente onde a máquina ferramenta será utilizada e, em seguida, testar as alternativas selecionadas pelo AHP como diferentes cenários. Como resultado, a simulação fornece o número de unidades adicionais produzidas em cada alternativa para auxiliar no processo de decisão.

No contexto da manufatura, a simulação não se restringe ao processo produtivo. Aplicações voltadas ao desenvolvimento de produtos e ao projeto de organizações também são possíveis. Um exemplo destas aplicações é o estudo de Ethiraj e Levinthal (2004), onde é analisado o impacto da modularidade e da inovação no projeto de sistemas complexos, que têm como exemplos as organizações e os produtos.

### **3 MÉTODO DE PESQUISA**

Este capítulo apresenta o método de pesquisa utilizado, composto por duas etapas. A primeira etapa do método, descrita na seção 3.1, consiste no processo de seleção das células estudadas. Na segunda etapa, seção 3.2, é detalhado o procedimento utilizado para o estudo das células selecionadas, visando verificar a linearidade da mão-de-obra.

#### **3.1 Seleção das Células para o Estudo**

A definição de célula, apresentada no capítulo 2, pode abranger uma diversidade de estruturas com características distintas. Para melhor delimitar este estudo, pretende-se estudar um conjunto menor dentre as diversas estruturas que atendem a definição de célula. Assim, nesta etapa foram definidas as características a serem observadas nas células estudadas. Entre os critérios utilizados na definição destas características estão: atendimento da definição de célula e viabilidade de execução do estudo.

Esta etapa também incluiu a prospecção de empresas que utilizassem em seus sistemas produtivos células que atendessem as características definidas. Este levantamento ocorreu através do contato com pessoas do meio empresarial e acadêmico. Para as empresas levantadas, foi avaliado se a estrutura celular em questão possuía as características definidas anteriormente. As células que possuíam tais características foram modeladas na etapa seguinte deste método.

#### **3.2 Modelagem e Simulação das Células Selecionadas**

Uma vez selecionadas as células, iniciou-se o processo de modelagem e simulação das mesmas, com o objetivo de verificar o comportamento da célula diante da alteração no número de operadores. Optou-se por utilizar uma ferramenta de simulação nesta etapa do método por permitir alterar as características do sistema modelado sem alterar seu funcionamento. Nesta etapa do método, utilizou-se como referência a estrutura proposta por Law (2007), juntamente com o referencial teórico pesquisado sobre os passos em um estudo com simulação, apresentado no capítulo 2.

Para cada célula selecionada, foi modelada apenas a família de maior volume. A escolha da modelagem de uma família por célula não afeta a análise em questão, pois a linearidade da mão-de-obra pode ser verificada a cada família. Isto torna os resultados obtidos

mais representativos de células com apenas uma família. Cabe ressaltar ainda, que famílias distintas da mesma célula podem apresentar comportamentos diferentes com relação à alteração no número de operadores. Entretanto, devido às semelhanças do trabalho padrão entre famílias da mesma célula, espera-se que os resultados obtidos possam se estender às outras famílias. Porém, a análise de alguns aspectos, como a influência do *setup*, fica prejudicada, devendo ser avaliada com mais atenção em estudos futuros. Desse modo, quando for feita referência ao desempenho da célula modelada estar-se-á fazendo referência ao desempenho da família modelada, como aproximação do desempenho da célula.

Além disso, nesta etapa foi realizada uma entrevista com o supervisor da célula com a finalidade de melhorar a compreensão sobre os efeitos na alteração do número de operadores, buscando assimilar a experiência da empresa. Esta foi realizada no chão-de-fábrica, junto à célula, através de questões abertas. Os tópicos abordados na entrevista contemplaram basicamente três aspectos. O primeiro diz respeito à existência ou não de flutuações na demanda para os produtos da célula e ao modo como a empresa administra estas flutuações. O segundo aspecto refere-se à necessidade e ao uso de diferente números de operadores na célula. O terceiro aspecto questionado diz respeito à linearidade da mão-de-obra, visando verificar se esta é observada na prática.

Com relação à coleta de dados, esta foi realizada pelo pesquisador através da observação direta em todos os casos. Complementando a estrutura de Law (2007), a estimativa inicial para o tamanho da amostra ( $n$ ) foi realizada com base no cálculo do tamanho de amostra para populações infinitas. Este valor foi utilizado como balizador para o processo de coleta, cabendo ao modelador julgar se esta amostra é suficiente para conter de modo representativo todos os eventos aleatórios que estão sendo modelados. Para cada caso, foi definido o erro esperado ( $e$ ), o nível de confiança desejado ( $z$ ) e o desvio padrão das amostras ( $s_x$ ), com base na natureza das atividades e na sua duração. A partir destes valores foi definido o valor de  $n$ , com base na expressão 6 (STEVENSON, 2001).

$$n = \frac{z^2 s_x^2}{e^2} \quad (6)$$

Por solicitação das empresas, os dados coletados foram normalizados multiplicando-se cada valor por uma constante, de modo a manter o sigilo. Cabe ressaltar que tal procedimento não altera os resultados desta pesquisa, pois o que se está avaliando é o desempenho relativo entre dois modos de funcionamento do sistema, e não seu desempenho

absoluto. A constante utilizada para multiplicar os dados é definida de modo a obter-se um tempo de ciclo para a célula próximo a sessenta segundos. Para estes dados normalizados foram ajustadas as distribuições utilizadas no modelo.

A verificação da hipótese de linearidade ocorreu a partir da comparação entre o cenário atual e o alternativo. O cenário atual representa o funcionamento da célula conforme observado durante a coleta de dados. Já o cenário alternativo foi desenvolvido a partir do cenário atual, visando estimar o desempenho da célula com a alteração no número de operadores. Este cenário alternativo não se constituiu da observação direta da célula pois em alguns casos não existia o trabalho padrão definido para outro número de operadores, ou, quando este existia, não era utilizado frequentemente, impossibilitando a coleta de dados. Desse modo, utilizou-se a simulação para representar o funcionamento da célula no cenário alternativo. Para os casos em que não havia um trabalho padrão definido para o cenário alternativo, este foi definido considerando-se a igual distribuição de tarefas entre operadores e o aproveitamento do ciclo automático dos equipamentos. Os dados necessários para a simulação do cenário alternativo foram estimados com base no cenário atual.

Estes cenários foram comparados com base no número de peças produzidas por hora. Para tanto, com base na produção obtida para o cenário atual, foi estimada a produção esperada para o cenário alternativo pela hipótese de linearidade da mão-de-obra, ver Figura 15. Esta estimativa foi confrontada com o valor obtido através da simulação do cenário alternativo. Caso a hipótese fosse verdadeira, era esperado que o resultado obtido para o cenário alternativo fosse coincidente com a estimativa obtida a partir do cenário atual. Tal

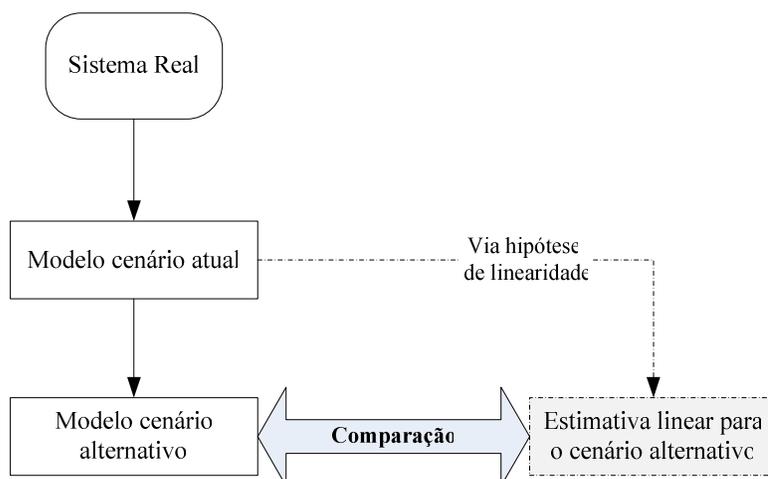


Figura 15: Estrutura para avaliação da linearidade da mão-de-obra.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

comparação ocorreu por meio da construção de intervalos de confiança pareados, descrito no item 2.2.6.9 do capítulo 2, para a variável correspondente à diferença entre a estimativa e o resultado do cenário alternativo. As possíveis diferenças encontradas foram investigadas visando esclarecer suas causas.

Finalmente, foi realizada uma síntese dos resultados obtidos nesta etapa. Estes resultados foram confrontados com a literatura existente, apresentada no capítulo 2. O objetivo desta discussão foi avaliar criticamente o desempenho dos sistemas modelados, melhorando a compreensão dos impactos causados pela alteração no número de operadores.

## 4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo relata a aplicação do método de pesquisa descrito no capítulo 3. A primeira seção apresenta o processo de seleção das células estudadas. Na segunda seção são apresentados três casos, realizados em células de manufatura de empresas distintas. Na última seção deste capítulo é apresentada a discussão dos resultados obtidos a partir do estudo destes casos.

### 4.1 Seleção das Células para o Estudo: Aplicação

Para atender a definição de célula, todas as estruturas estudadas deveriam conter equipamentos distintos, dispostos de modo a seguir a seqüência de processamento dos produtos. Ainda, buscaram-se estruturas que também atendessem as características de fluxo contínuo, independência e alocação dos operadores às atividades, definidas no capítulo 2.

Complementando a característica de alocação dos operadores às atividades, as células estudadas deveriam ser células manuais, onde os equipamentos possuíssem pelo menos automação do ciclo de máquina. Os operadores deveriam trabalhar em pé e caminhando, atendendo equipamentos distintos. Estas características foram definidas como necessárias para que fosse possível analisar a variação no número de operadores em ambientes onde o trabalho destes fosse típico de células de fabricação. Como características de ordem prática, as células estudadas deveriam conter entre 2 e 4 operadores, visando à exequibilidade do estudo em função do volume de dados a serem coletados e do tempo disponível para a execução do mesmo. Ainda, esta escolha é motivada pelo fato de 72% das células apresentarem cinco operadores ou menos (WEMMERLÖV, JOHNSON, 2000).

Durante a prospecção de células para o estudo, observou-se que nem todas as estruturas denominadas células atendiam as características desejadas. Das cinco empresas visitadas para a realização do estudo, duas células não reuniam as características desejadas. Uma delas não atendia a característica fundamental de organização dos equipamentos, sendo constituída de um operador operando seis máquinas idênticas. A outra estrutura descartada para este estudo era uma linha de montagem com aproximadamente 28 operadores em *layout* em U, onde os operadores trabalhavam em postos de trabalho fixos, não atendendo às características do trabalho em células de fabricação e nem de ordem prática. As demais estruturas, três células, foram consideradas neste estudo, sendo apresentadas em detalhes na seção seguinte.

## 4.2 Modelagem e Simulação das Células Selecionadas: Aplicação

Nesta seção os casos observados são apresentados separadamente. Porém, seu desenvolvimento ocorreu de modo paralelo durante parte desta pesquisa. Conforme apresentado no capítulo 3, os casos estudados tiveram os tempos de atividade multiplicados por uma constante por solicitação das empresas. Desse modo, os três casos serão apresentados com os tempos normalizados, sendo seu tempo de ciclo meta de sessenta segundos. Ainda, para cada célula em análise foi escolhida uma família a ser simulada, visando avaliar a linearidade da mão-de-obra. Tal avaliação tem como base a comparação de dois cenários. Um cenário atual, representando o funcionamento observado diretamente na célula, e um cenário alternativo, alterando-se o número de operadores. Para a simulação dos casos estudados foi utilizado o *software* ProModel. Este foi escolhido pela sua capacidade de representação dos sistemas produtivos em geral e pela disponibilidade de uma versão completa do *software*, sem restrições de recursos de modelagem.

### 4.2.1 Caso 1: Empresa A

Sediada em Porto Alegre, a empresa A atua no setor metal-mecânico e conta com aproximadamente 1500 funcionários. Esta produz componentes de veículos de diferentes segmentos, sendo fornecedora direta de diferentes montadoras. Para estudo deste caso foram realizadas 9 visitas, com duração aproximada de 3 a 4 horas.

#### 4.2.1.1 Descrição da célula: Empresa A

As informações aqui apresentadas visam proporcionar o entendimento do funcionamento da célula. Para tanto, é descrita a seqüência de atividades dos operadores, junto com a seqüência de processamento das peças.

O item produzido na célula pesa em torno de 3,5kg, e constitui-se de um eixo de aço, componente principal, ao qual são acrescentados outros componentes secundários. A colocação destes componentes exige o uso de prensas para que ocorra a interferência mecânica determinada no projeto. Assim, apesar de ser uma célula de montagem, esta preserva as características de células de fabricação, como ciclo automático dos equipamentos. Nesta célula trabalham três operadores, que realizam suas atividades em pé e caminhando,

utilizando mais de um equipamento. A célula em estudo já possui alto grau de padronização das atividades, revisado recentemente durante um ciclo de melhorias.

Nesta célula são fabricados itens classificados em duas famílias distintas. Somente será modelada a família de maior volume que é responsável por aproximadamente 70% do total de itens montados na célula. Quando existe a necessidade de produção de itens de famílias distintas existe a necessidade de um *setup* na célula.

A partir da entrevista realizada, constatou-se a existência de variações na demanda dos itens produzidos na célula. Esta variação é administrada pela inclusão (ou exclusão) na célula de uma ou mais famílias de produtos.

O processo de montagem é ilustrado na Figura 16. Esta figura representa a transformação do componente principal, eixo, em uma peça pronta. Ao longo do processo são agregados ao componente principal os demais componentes. Neste processo ocorrem operações automáticas, realizados pelos equipamentos E1 a E5, e operações manuais, realizados nos postos P1 a P5. Os equipamentos que compõem a célula realizam diferentes etapas de processamento das peças. Ainda, observa-se na Figura 16 que estes equipamentos estão agrupados segundo a seqüência de processamento das peças, atendendo a definição de célula.

A seguir é realizada a descrição das atividades de cada operador, necessária para o entendimento do funcionamento da célula. Nesta célula, o operador 1 inicia seu ciclo no posto P1, onde pega o componente principal na caixa e realiza sobre este a montagem de outros 4 itens. Após a montagem, o operador coloca a peça recém montada no equipamento E1, acionando-o para a realização da operação automática. Ele realiza a montagem dos componentes em pé e, após o acionamento de E1, desloca-se para o posto P2. Em P2 ele pega a peça do suporte, deixada pelo operador 2, e desloca-se para P3. A peça retirada do suporte é colocada em E4. Este equipamento, E4, deve ter sido preparado pelo operador 2, fixando neste o componente vindo de E3, para que o operador 1 possa colocar o componente principal no equipamento. Em seguida o operador 1 aciona E4 para iniciar o ciclo automático e retorna para P2. Em P2, o operador pega o eixo pronto do E1 e coloca em E2. Este eixo é o mesmo eixo montado e deixado em processamento no início do ciclo. Sobre este eixo é montado o componente testado no *poka-yoke* pelo operador 2. Após esta atividade o operador aciona E2 e retorna ao posto P1, dando início a um novo ciclo.

O operador 2 inicia seu ciclo no posto P3, retirando um componente processado em E3, cujo abastecimento é automático (ao retirar um componente o próprio equipamento disponibiliza o próximo, cujo abastecimento ocorre em lotes pelo lado externo à célula). Em

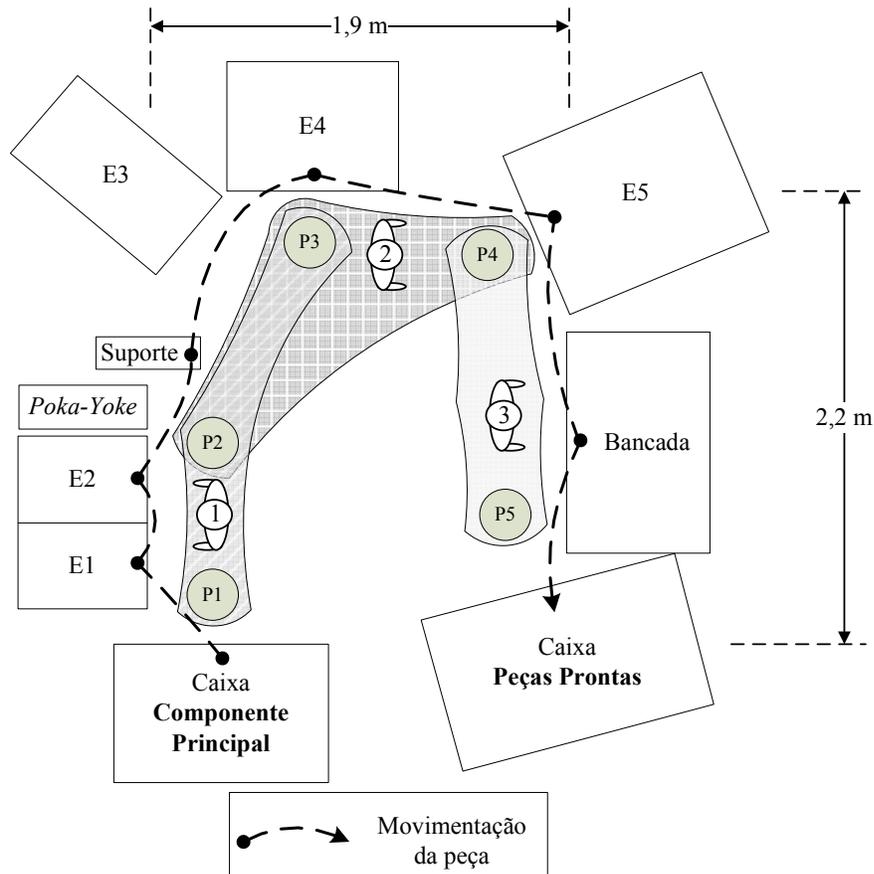


Figura 16: Representação esquemática da célula para o cenário atual (três operadores), caso 1.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

seguida o operador 2 retira a peça pronta em E4 e coloca o componente vindo de E3, preparando E4 para receber o próximo componente principal trazido pelo operador 1. A peça retirada de E4 é levada para o posto P4, onde é colocada no equipamento E5, acrescentados outros 4 itens de montagem e acionado o equipamento. Após estas atividades, todos os componentes necessários foram montados e a peça já está pronta. Em seguida, o operador 2 dirige-se para o posto P2, onde coloca um componente no *poka-yoke*, aguarda o resultado do teste (sinal luminoso) e transfere a peça processada em E2 para o suporte. Finalmente, operador 2 retorna para P3, iniciando um novo ciclo.

O terceiro operador, por sua vez, inicia seu ciclo no posto P4, onde coloca uma proteção na peça pronta, retirando-a do equipamento E5 e deslocando-a para o posto P5. Neste posto o operador 3 coloca a peça sobre a bancada, coloca uma etiqueta e realiza a verificação e liberação do produto. Após isto, esta peça é retirada da bancada e é colocada na caixa de peças prontas. Ao retornar para o posto P4 encerra-se o ciclo do operador 3.

As peças aprovadas na inspeção são colocadas na caixa de peças prontas próxima ao corredor do acesso. Quando uma caixa é completamente preenchida, o abastecedor que dá suporte à célula retira esta e repõe no mesmo lugar uma caixa vazia. Isto permite que o operador 3 tenha um ciclo constante, aumentando a estabilidade da célula. Da mesma forma, os componentes utilizados na célula também são abastecidos por este operador auxiliar, mantendo os operadores focados apenas nas atividades de montagem.

#### 4.2.1.2 Modelo conceitual: Empresa A

A seguir é descrito o modelo desenvolvido, visando representar a descrição realizada no item anterior em uma forma passível de ser simulada. Devido aos objetivos do estudo, teve-se especial atenção com relação à modelagem dos operadores. Neste modelo, foram desconsiderados os tempos de *setup*, devido à modelagem de apenas uma família.

Na modelagem das atividades dos operadores, o primeiro aspecto considerado foi a necessidade de realocação de atividades entre eles, para a construção do cenário alternativo. Para atender esta necessidade, separou-se tanto quanto possível as atividades de operação manual das atividades de deslocamento do operador. Neste modelo os tempos de atividades manuais e de deslocamentos foram modelados através de distribuições de probabilidade. Já os tempos de processamento automático dos equipamentos foram modelados através de valores determinísticos, devido à baixa variabilidade observada relativamente à ordem de grandeza das outras variabilidades. O processo de coleta de dados e obtenção das distribuições de probabilidade é apresentado no próximo item.

Quanto à modelagem das atividades dos operadores, para o operador 1 foram estabelecidas três atividades de operação manual e três de deslocamento, apresentadas na Figura 17. Também são apresentados os tempos médios para cada atividade e os tempos de ciclo automático, correspondentes ao equipamento acionado. Estes valores são resultado do processo de coleta de dados, e são apresentados aqui para facilitar a localização dos tempos das atividades.

A atividade Op1At1 compreende o tempo desde o acionamento de E2 até acionar o equipamento E1. Esta atividade engloba o deslocamento entre P2 até a caixa do componente principal. Isto ocorre pois o operador aciona E2 com o braço direito, enquanto com o braço esquerdo pega o primeiro componente a ser montado, localizado próximo a E1. Desse modo, considerou-se este deslocamento como parte da movimentação no posto de trabalho, pois o operador já iniciou o processo de montagem.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op1At1	Mover-se de P2 até P1, pegar componentes, montar e colocar em E1. Acionar E1.	18,8"	12,2"
2	Op1Mov1	Movimentar-se de P1 até suporte em P2.	5,53"	-
3	Op1Mov2	Movimentar-se do suporte em P2 até P3.	2,25"	-
4	Op1At2	Colocar componente principal em E4 e acionar E4.	3,69"	35,0"
5	Op1Mov3	Movimentar-se de P3 até P2.	3,15"	-
6	Op1At3	Mover componente principal de E1 para E2, montar componente vindo do <i>poka-yoke</i> . Acionar E2.	12,5"	11,0"
<b>Total</b>			<b>45,9"</b>	<b>58,2"</b>

Figura 17: Atividades do operador 1, caso 1.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Na movimentação Op1Mov1, tempo decorrido entre o acionamento de E1 até chegar ao suporte, está incluído o tempo de retirada do componente principal do suporte. Isto ocorre porque o operador não pára durante a realização desta atividade. Ainda, era necessário separar o movimento em duas etapas, Op1Mov1 e Op1Mov2, pois em alguns momentos o operador 1 esperava que o operador 2 realizasse suas atividades em P3. Como consequência, o operador 1 aguardava próximo ao suporte com o eixo na mão. Tão logo o operador 2 deixava P3, o operador 1 já estava a um passo do posto. Sem a separação do movimento em duas partes não seria possível modelar a espera do operador 1 já próximo a P3.

Para o operador 2 também foram identificadas três atividades e três deslocamentos, apresentadas a seguir na Figura 18. Já para o operador 3 foram definidas apenas duas atividades manuais e duas movimentações, apresentadas a seguir na Figura 19.

Na atividade Op3At2, da colocação do eixo na bancada até largar a peça pronta na caixa, está incluído o tempo de deslocamento entre a bancada e a caixa de peças prontas. Isto ocorre porque durante este trajeto o operador realiza o teste de torque e mesmo que a deslocamento seja alterada isto não representará uma redução no tempo de operação manual.

Para a simulação do modelo aqui descrito assume-se que a célula opera em regime permanente durante maior parte do seu tempo. Isto é proposto pois não há formação de estoque na célula, e tão logo o estoque interno esteja posicionado, a célula opera em regime permanente. Desse modo, as estimativas obtidas via simulação, para este caso, referem-se ao regime permanente do sistema. A medida utilizada para avaliar o desempenho do sistema, e confrontá-lo com o cenário alternativo, foi o número médio de peças produzidas por hora.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op2At1	No posto P3, pegar componente em E3. Início do ciclo automático em E3. Retirar peça pronta em E4 e colocar componente vindo de E3 em E4.	6,68"	32,8"
2	Op2Mov1	Movimentar-se de P3 até P4	5,31"	-
3	Op2At2	Colocar peça trazida de E4 em E5, montar componentes e acionar E5.	17,8"	4,88"
4	Op2Mov2	Movimentar-se de P4 até P2	4,07"	-
5	Op2At3	Colocar componente em teste no <i>poka-yoke</i> e mover componente principal de E2 para o suporte.	16,1"	-
6	Op2Mov3	Movimentar-se do suporte em P2 até P3.	1,87"	-
<b>Total</b>			<b>51,8"</b>	<b>37,7"</b>

Figura 18: Atividades do operador 2, caso 1.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op3At1	No posto P4, colocar proteção na peça e retirá-la de E5.	6,12"	-
2	Op3Mov1	Movimentar-se de P4 até P5.	3,19"	-
3	Op3At2	Colocar peça no suporte, colar etiqueta, verificar e liberar o produto. Colocar a peça pronta na caixa.	37,9"	-
4	Op3Mov2	Movimentar-se de P5 até P4.	4,90"	-
<b>Total</b>			<b>52,1"</b>	<b>0,0"</b>

Figura 19: Atividades do operador 3, caso 1.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#### 4.2.1.3 Coleta de dados: Empresa A

Na realização da coleta de dados considerou-se que não existe alteração no comportamento do sistema entre os dias da semana. Isto é proposto, pois é exigida a mesma produção de modo independente do dia da semana, imprimindo o mesmo ritmo de trabalho todos os dias. As amostras utilizadas neste trabalho foram coletadas com observações apenas no segundo turno de funcionamento da empresa, sendo o modelo representativo para este turno. A dificuldade de coleta de dados em outros turnos ocorreu devido à necessidade de acompanhamento por parte de um funcionário da empresa durante toda a coleta de dados. Este processo de coleta de dados foi realizado pelo próprio pesquisador.

Durante a realização da coleta de dados, eventos que alteravam o tempo de operação, mas não eram causados pela variabilidade da própria operação, foram descartados. Dessa forma, os dados coletados representam o funcionamento da célula sem as pequenas paradas que eventualmente ocorrem.

Para definir o tamanho da amostra a ser coletada para as atividades manuais e de deslocamento descritas anteriormente, calculou-se o tamanho de amostra necessário conforme descrito no capítulo 3. Neste caso, o tempo real médio das atividades a serem coletadas foi observado em 5 segundos. Assim, neste cálculo considerou-se uma confiança de 95% ( $z = 1,96$ ), um erro de 0,5 segundos e um desvio padrão de 1,5 segundos. Para estes valores obteve-se um tamanho de amostra igual a 34,6. Assim, considerando a possibilidade de eliminação de alguns pontos da amostra definiu-se o tamanho da amostra em 40. Os dados coletados foram utilizados para obter as distribuições de probabilidade correspondentes às atividades em questão.

Para representação do tempo de processamento automático dos equipamentos foram utilizados valores determinísticos, Tabela 2. Estes foram definidos como a média de cinco observações. Os dados utilizados para gerar as distribuições, assim como para gerar a média do tempo de processamento dos equipamentos, estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 2: Tempo de ciclo automático por equipamento, caso 1.

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>
Média	12,18	11,04	32,82	35,02	4,88

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para cada uma das atividades manuais ou de deslocamento foi ajustada uma distribuição de probabilidade utilizando o *software* StatFit. As distribuições utilizadas para cada uma das atividades estão apresentadas na Tabela 3. Para cada distribuição foram utilizados dois testes para avaliar a qualidade do ajuste: Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Anderson-Darling (A-D). Nas colunas dos respectivos testes (K-S e A-D) o valor informado corresponde ao valor de  $p$  para o teste. Neste caso, como a hipótese nula é a correspondência entre os dados e a distribuição, espera-se que a hipótese nula não seja rejeitada. Assim, para uma confiança de 95%, valores de  $p$  maiores do que 0,05 indicam a adequação do ajuste realizado. Neste caso, as atividades Op3Mov1 e Op3Mov2 apresentaram resultados próximos do limite para o teste A-D, porém obtiveram valores distantes do limite para o teste K-S, justificando sua aceitação.

Além dos dados necessários para caracterizar as atividades da célula, também foram coletados dados para a validação do modelo. Para a validação foram coletados, em dias

Tabela 3: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades dos operadores, caso 1.

Atividade	Distribuição teórica	Expressão	Média	K-S	A-D
Op1At1	Inversa Gaussiana	$14,9+IG(8,64; 3,92)$	18,77	0,999	0,999
Op1Mov1	Log-Logistic	$0,642+4,25*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/3,48)$	5,53	0,946	0,947
Op1Mov2	Pearson 5	$-17+P5(1,42e+03; 2,72e+04)$	2,25	0,533	0,600
Op1At2	Weibull	$-16,9+W(36,8; 21)$	3,69	0,405	0,620
OP1Mov3	Inversa Gaussiana	$0,778+IG(23; 2,37)$	3,15	0,918	0,942
Op1At3	Inversa Gaussiana	$10,2+IG(5,35; 2,33)$	12,52	0,924	0,986
Op2At1	Pearson 5	$-3,43+P5(79; 789)$	6,68	0,990	0,995
Op2Mov1	Weibull	$2,82+W(1,36; 2,72)$	5,31	0,978	0,948
Op2At2	Log-Logistic	$4,73+12,7*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/7,34)$	17,80	0,750	0,808
Op2Mov2	Weibull	$2,17+W(2,65; 2,14)$	4,07	0,998	0,999
Op2At3	Log-Logistic	$3,16+12,5*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/7,06)$	16,07	0,998	0,998
Op2Mov3	Log-Logistic	$0,236+1,47*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/3,98)$	1,87	0,926	0,798
Op3At1	Triangular	$T(2,32; 4,38; 11,7)$	6,12	0,922	0,956
Op3Mov1	Log-Logistic	$1,56+1,02*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/1,97)$	3,19	0,959	0,074
Op3At2	Pearson 5	$25+P5(8,04; 91)$	37,90	0,773	0,836
Op3Mov2	Log-Logistic	$2,74+1,68*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/2,63)$	4,90	0,796	0,063

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

distintos, o tempo de ciclo da célula e o tempo de atravessamento da célula. Ainda, os dados de cada uma destas variáveis foram coletadas com um intervalo de tempo entre coletas de aproximadamente meia hora. Estes dados são apresentados e discutidos no item referente à validação do modelo.

#### 4.2.1.4 Modelo computacional: Empresa A

O modelo computacional construído constitui-se numa representação do modelo conceitual definido no item 4.2.1.2. O processo de implementação deste modelo passou pela construção de modelos intermediários até representar de forma completa o modelo desejado. Este processo de implementação computacional é apresentado com mais detalhes no Apêndice A, juntamente com o código gerado.

Após a verificação do código programado, buscou-se estimar o período de *warm-up* necessário para estimar as características do sistema em regime permanente. As variáveis utilizadas nesta definição foram o tempo de ciclo (TC) e o tempo de atravessamento (TA). A estimativa do período de *warm-up* seguiu o método revisado no capítulo 2. Os dados necessários foram obtidos a partir da simulação de 10 replicações com duração de 20 horas. Utilizando um valor de 50 peças para o parâmetro referente à amplitude da média móvel, construiu-se o gráfico da Figura 20. Neste gráfico,  $i$  representa a  $i$ -ésima peça pronta do modelo simulado. O valor apresentado no gráfico para cada  $i$  é a média dos 101 pontos

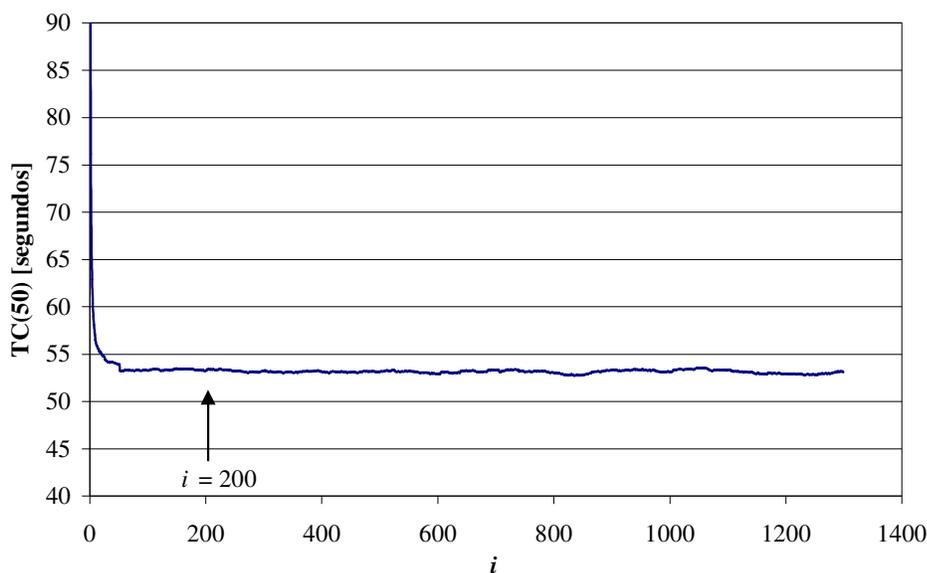


Figura 20: Gráfico do tempo de ciclo para a definição do tempo de *warm-up*.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

adjacente, centrados em  $i$ . Neste caso, as primeiras estimativas apresentam elevado tempo de ciclo, cujo comportamento passa a ser estável a partir de  $i = 200$ .

Na Figura 21 é apresentado o gráfico para o tempo de atravessamento em função de  $i$ , também representado pela média dos 101 pontos adjacentes e centrados em  $i$ . Neste caso, observa-se a estabilidade do sistema a partir de  $i = 420$ . Assim, definiu-se como ponto de final do *warm-up*  $i = 420$  (maior valor), correspondendo a um período de aproximadamente 7 horas (420 peças / 60 peças/h).

#### 4.3.1.5 Validação do modelo: Empresa A

Após a definição do período de *warm-up* (7 horas) iniciou-se a validação do modelo. Como medida para a validação utilizou-se o tempo de ciclo da célula. Esta medida possui como vantagem a possibilidade de ser medida diretamente na célula, além de possuir relação direta com a produção por hora, medida utilizada na avaliação da linearidade da mão-de-obra. Como a produção por hora pode ser definida a partir do tempo de ciclo ( $3600s/TC$ ), a validade para o tempo de ciclo sugere que este modelo seja válido também para estimar a produção por hora da célula.

Para a validação do modelo foram utilizadas 8 amostras do tempo de ciclo do sistema real. Cada uma destas amostras era composta pela média de cinco tempos de ciclos do sistema

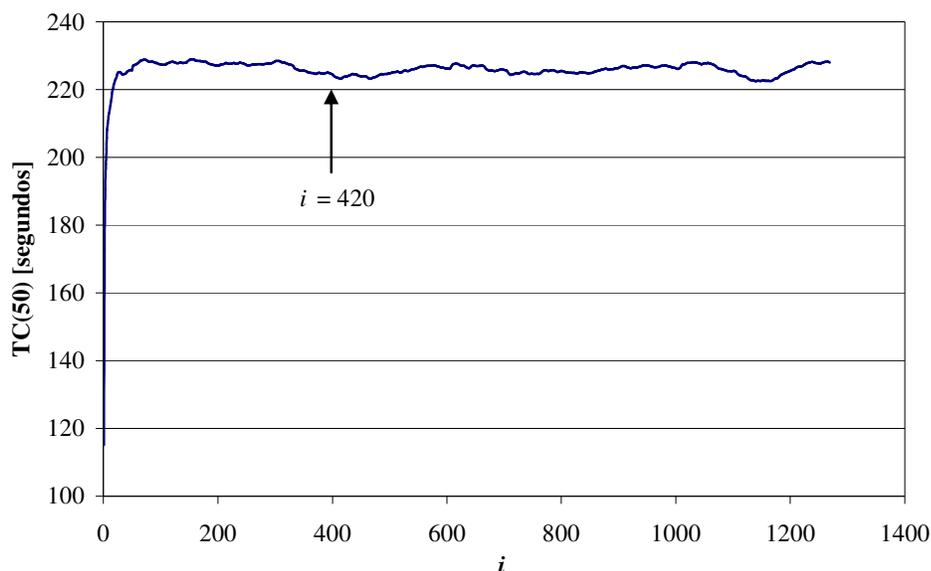


Figura 21: Gráfico do tempo de atravessamento para a definição do tempo de *warm-up*.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

real. Para obter as estimativas do modelo para o tempo de ciclo foram realizadas 8 replicações independentes com duração de 10 horas além do tempo de *warm-up*. Estas replicações foram realizadas com números aleatórios diferentes daqueles utilizados para definição do período de *warm-up*. Os valores das amostras coletadas do sistema real,  $TC_r$ ; e das estimativas do modelo,  $TC_m$ , são apresentados na **Erro! Auto-referência de indicador não válida.**, seguidos pela diferença entre  $TC_m$  e  $TC_r$ .

Tabela 4: Validação pelo tempo de ciclo, caso 1.

Replicação	$TC_r$	$TC_m$	$TC_m - TC_r$
1	53,75	53,17	-0,58
2	56,21	53,07	-3,14
3	51,35	53,08	1,73
4	62,52	53,36	-9,16
5	48,19	53,01	4,82
6	49,79	52,98	3,19
7	48,90	53,24	4,34
8	49,00	53,17	4,17
Média	52,46	53,14	0,67
Desvio Padrão	4,90	0,13	4,83
Erro (7gl, 95%)	3,29	0,08	3,24

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para a variável  $TC_m - TC_r$ , foi construído o intervalo de confiança de 95% com 7 graus de liberdade a partir da distribuição *t*-Student ( $t = 1,895$ ), resultando num limite

superior de 3,91 e num limite inferior de -2,57. Como este intervalo contém o valor zero, considera-se o modelo construído uma aproximação válida para a estimativa do tempo de ciclo e para a produção por hora. Com relação aos desvios padrão, observa-se uma diferença aparentemente significativa entre o modelo e o sistema real. Este fato é coerente com o fato do modelo não sofrer a influência das pequenas paradas. Porém, isto indica que o modelo é mais representativo para estimar a média de produção por hora do sistema do que para estimar a variabilidade desta medida.

Como medida auxiliar para validação do sistema foi verificado também o tempo de atravessamento,  $TA$ , da célula. Para esta variável também foram coletadas oito amostras compostas pela média de cinco observações. Na Tabela 5 são apresentados os dados coletados e as estimativas do modelo para 8 replicações. Neste caso, o limite superior obtido para a variável  $TA_m - TA_r$  foi de 6,5 e o limite inferior -46,48, com confiança de 95% e 7 graus de liberdade. Novamente o intervalo contém o valor zero, indicando a representatividade do modelo. Estes resultados em conjunto justificam a aceitação do modelo como uma representação válida para os objetivos deste estudo.

Tabela 5: Validação pelo tempo de atravessamento, caso 1.

Replicação	$TA_r$	$TA_m$	$TA_m - TA_r$
1	218,44	227,88	9,44
2	244,22	224,66	-19,56
3	334,89	225,31	-109,58
4	240,21	225,80	-14,41
5	220,66	223,54	2,88
6	232,45	224,75	-7,70
7	214,02	227,63	13,61
8	260,37	225,75	-34,62
Média	245,66	225,67	-19,99
Desvio Padrão	39,19	1,48	39,53
Erro (7gl, 95%)	26,26	0,99	26,49

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#### 4.3.1.6 Cenário alternativo: Empresa A

Neste item é apresentado o cenário alternativo (dois operadores), desenvolvido a partir da alteração no número de operadores do cenário atual (três operadores). Como a célula em estudo não possui trabalho padrão definido para outro número de operadores, optou-se por modelar um cenário com dois operadores por ser uma situação já observada na célula. Na entrevista, quando questionado sobre a produção da célula para dois operadores, foi informado que não existiam registros com dois operadores, mas que esta deveria ser dois

terços da produção atual. Esta suposição de dois terços por parte do entrevistado fornece um indicativo que o mesmo reconhece o conceito de linearidade da mão-de-obra e que esta poderia ser alcançada ao se variar o número de operadores. Na Figura 22, é apresentada uma representação do funcionamento definido para a célula com dois operadores.

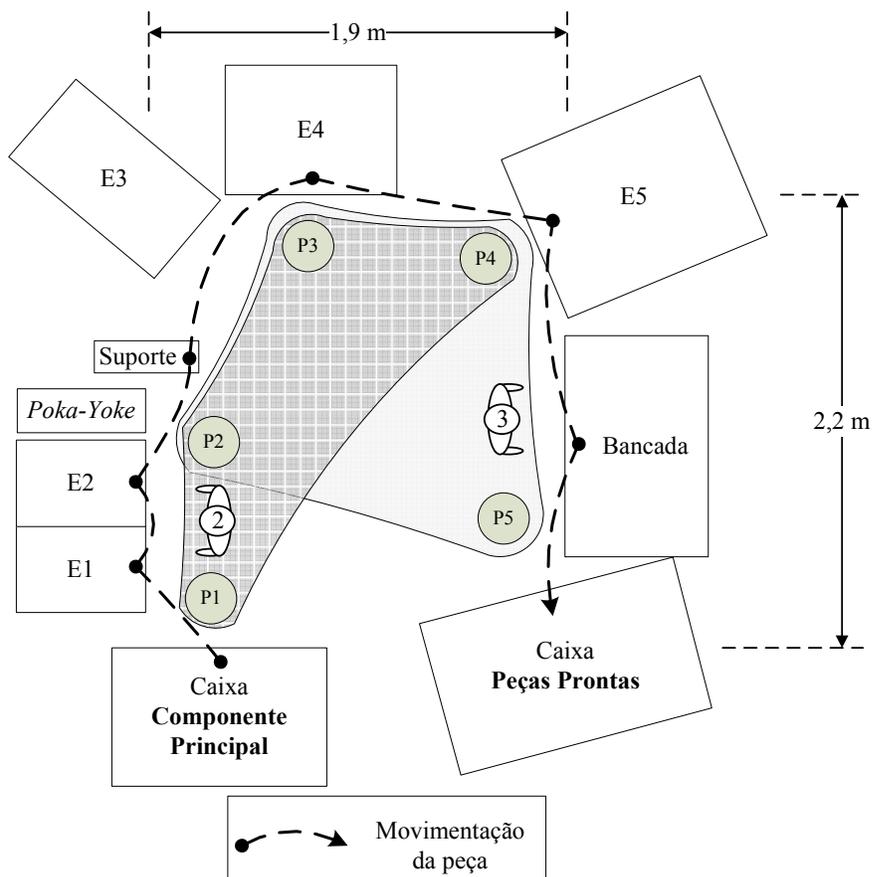


Figura 22: Representação esquemática da célula para o cenário alternativo (dois operadores), caso 1.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Inicialmente foram definidas as atividades que cada operador deveria realizar. Estas levaram em consideração o equilíbrio entre o tempo de atividade de cada um dos operadores, o tempo de deslocamento necessário e o tempo de ciclo automático de cada equipamento. Como resultado, as atividades do operador 1 foram distribuídas entre os operadores 2 e 3.

Neste novo cenário alguns deslocamentos foram modificados e outros que antes não existiam passaram a ser necessários. Estes novos tempos de deslocamentos foram definidos como uma razão linear da distância, supondo que a velocidade de deslocamento seja constante. Assim, no trabalho padrão do operador 2 para esta configuração, o valor original do tempo de Op2Mov2 (4,07s) foi multiplicado pela nova distância a ser percorrida (2,4m), e

#	Atividade	Descrição	Atividade Manual	Ciclo Automático
1	Op2At1	No posto P3, pegar componente em E3. Início do ciclo automático em E3. Retirar peça pronta em E4 e colocar componente vindo de E3 em E4.	6,68"	32,8"
2	Op2Mov1	Movimentar-se de P3 até P4	5,31"	-
3	Op2At2	Colocar peça trazida de E4 em E5, montar componentes e acionar E5.	17,8"	4,88"
4	Op2Mov2'	Movimentar-se de P4 até (P2) P1	5,75"	-
5	Op1At1	Pegar componentes, montar e colocar em E1. Acionar E1.	18,8"	12,2"
6	Op1Mov1'	Movimentar-se de P1 até (suporte em P2) P2.	3,38"	-
7	Op2At3	Colocar componente em teste no <i>poka-yoke</i> e mover componente principal de E2 para o suporte.	16,1"	-
8	Op2Mov3	Movimentar-se de P2 até P3.	1,87"	-
<b>Total</b>			<b>75,6"</b>	<b>49,9"</b>

Figura 23: Atividades do operador 2 no cenário alternativo, caso 1.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

dividido pela distância percorrida anteriormente (1,7m). Assim, na Figura 23 número 4 (#4), o destino anterior (P2) aparece sobrescrito, sendo o novo destino (P1) acrescentado ao lado. Do mesmo modo, o valor original de Op1Mov1 (5,53s) foi multiplicado por (0,55m) e dividido por (0,9m). Na simulação estes valores multiplicam as distribuições de probabilidade associada a estes deslocamentos.

Para o terceiro operador, ver Figura 24, Op3Mov2 (4,9s) foi multiplicada por 1,3m e dividido por 1,6m. Para o tempo de movimentação Op1Mov1 (5,53s) foi multiplicado por 0,35m e dividido por 0,9m. A última distribuição corrigida por um multiplicador não foi realizada em função da variação das distâncias. Para Op2Mov1 (5,31s) foi estimado uma redução de 10% no tempo de deslocamento devido ao fato do operador realizar este trajeto sem carga. Logo, utilizou-se um multiplicador de 0,9, para esta distribuição.

Após a definição do novo trabalho padrão, este foi programado alterando-se o código do modelo validado. Concluída a programação do modelo, verificou-se se o período de *warm-up* definido para o modelo inicial era suficiente para este modelo alternativo. Para tanto, foram construídos a partir de 10 replicações de 20 horas, os gráficos do tempo de ciclo, Figura 25, e do tempo de atravessamento, Figura 26. Semelhante aos anteriores, estes gráficos apresentam a média para os 101 pontos adjacentes centrados em cada  $i$ . Um período de 7

#	Atividade	Descrição	Atividade Manual	Ciclo Automático
1	Op3At1	No posto P4, colocar proteção na peça e retirá-la de E5.	6,12"	-
2	Op3Mov1	Movimentar-se de P4 até P5.	3,19"	-
3	Op3At2	Colocar peça no suporte, colar etiqueta, verificar e liberar o produto. Colocar a peça pronta na caixa.	37,9"	-
4	Op3Mov2'	Movimentar-se de P5 até (P4) P2	3,98"	-
5	Op1At3	Mover componente principal de E1 para E2, montar componente vindo do <i>poka-yoke</i> . Acionar E2.	12,5"	11,0"
6	Op1Mov1''	Movimentar-se de (P4) P2 até suporte em P2.	2,15"	-
7	Op1Mov2	Movimentar-se do suporte em P2 até P3.	2,25"	-
8	Op1At2	Colocar componente principal em E4 e acionar E4.	3,69"	35,0"
9	Op2Mov1'	Movimentar-se de P3 até P4 (com carga).	4,78"	-
<b>Total</b>			<b>76,6"</b>	<b>46,1"</b>

Figura 24: Atividades do operador 3 no cenário alternativo, caso 1.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

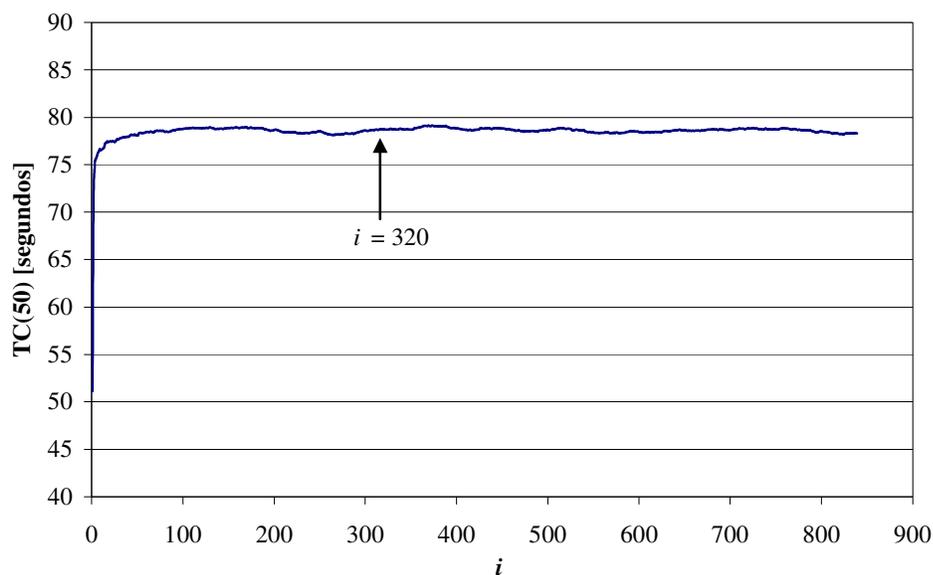


Figura 25: Gráfico do tempo de ciclo para definição do período de *warm-up* do cenário alternativo, caso 1.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

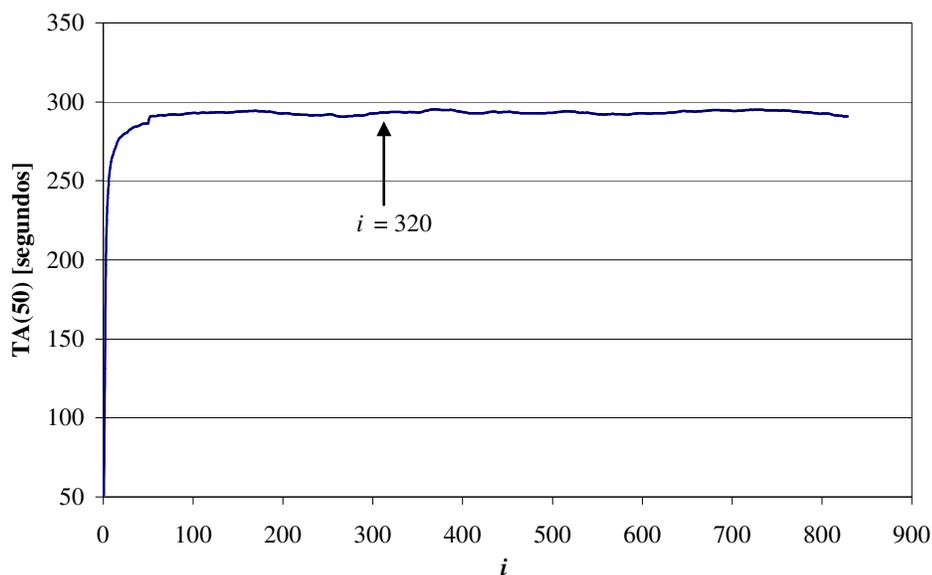


Figura 26: Gráfico do tempo de atravessamento para definição do período de *warm-up* do cenário alternativo, caso 1.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

horas de *warm-up* definido para o modelo do estado atual corresponde a um valor de  $i$  de aproximadamente 320. A partir dos gráficos apresentados concluiu-se que o valor de *warm-up* definido para o modelo do estado atual serve para o modelo do estado alternativo.

Após a verificação do período de *warm-up* analisou-se a validade do cenário alternativo. Para tanto, foi novamente questionado se a distribuição de atividades entre os operadores era de fato exequível na prática e se a ordem de processamento do item era atendida. Ainda, a estimativa feita pelo supervisor com relação à produção esperada para o cenário com dois operadores não foi considerada com vistas à validação. Uma vez que esta não se tratava de uma estimativa com base na observação do funcionamento do sistema, julgou-se mais relevante na validação o fato deste cenário ser uma extensão do cenário para três operadores. Ao final desta etapa, este cenário alternativo também foi considerado válido, com vistas à verificação da linearidade da mão-de-obra.

#### 4.3.1.7 Análise da linearidade da mão-de-obra: Empresa A

Para avaliar a linearidade da mão-de-obra foram geradas 20 replicações válidas com duração de 10 horas (após o período de *warm-up* de 7 horas) para os dois cenários. Para cada cenário foram utilizados números aleatórios distintos entre si e daqueles utilizados nas etapas

anteriores. Com relação à produção por hora da célula foram obtidos os valores apresentados na Tabela 6. Nesta tabela, são apresentados para cada uma das 20 replicações: a produção por hora da célula para o modelo com 3 operadores ( $P_{3op}$ ) e para o modelo com 2 operadores ( $P_{2op}$ ). Além destes, são apresentados os valores de  $P_{3op}$  multiplicados por  $2/3$  ( $\hat{P}_{2op}$ ), que representam os valores esperados caso a hipótese de linearidade da mão-de-obra seja válida. A última coluna da Tabela 6 contém a diferença entre  $P_{2op}$  e  $\hat{P}_{2op}$ .

Tabela 6: Produção por hora obtido para 3 e 2 operadores, caso 1.

Replicação	$P_{3op}$	$\hat{P}_{2op}$	$P_{2op}$	$P_{2op} - \hat{P}_{2op}$
1	67,30	44,87	46,00	1,13
2	67,70	45,13	45,70	0,57
3	67,70	45,13	45,80	0,67
4	67,90	45,27	46,10	0,83
5	67,70	45,13	45,90	0,77
6	67,80	45,20	45,80	0,60
7	67,60	45,07	45,80	0,73
8	67,50	45,00	45,70	0,70
9	67,30	44,87	45,70	0,83
10	67,80	45,20	45,80	0,60
11	67,90	45,27	45,80	0,53
12	67,60	45,07	45,80	0,73
13	67,90	45,27	45,60	0,33
14	67,30	44,87	45,50	0,63
15	67,80	45,20	45,60	0,40
16	67,60	45,07	45,90	0,83
17	67,50	45,00	45,80	0,80
18	67,20	44,80	46,10	1,30
19	67,70	45,13	45,70	0,57
20	68,10	45,40	45,80	0,40
Média	67,65	45,10	45,80	0,70
Desvio Padrão	0,24	0,16	0,15	0,23
Erro (19gl, 95%)	0,09	0,06	0,06	0,09

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para avaliar a necessidade de um maior número de replicações avaliou-se a representatividade do erro obtido nos dois cenários. Para tanto, calculou-se o erro para 95% de confiança ( $t = 1,729$ ), apresentado na Tabela 6. Neste caso, obteve-se um erro percentual de 0,13% ( $100 \cdot 0,09/67,65$ ) para  $P_{3op}$  e de 0,13% ( $100 \cdot 0,06/45,80$ ) para  $P_{2op}$ . Dessa forma julgou-se desnecessária a coleta de mais replicações.

O intervalo de confiança para ( $P_{2op} - \hat{P}_{2op}$ ) também foi calculado para uma confiança de 95% ( $t = 1,729$ ), resultando num limite superior de 0,79 peças e num limite inferior de 0,61 peças. Como o valor zero não pertence ao intervalo, tem-se um indicativo de que a diferença

entre as estimativas é significativa. Este resultado indica que o cenário com 2 operadores possui uma produção por hora maior do que o esperado pela estimativa de linearidade, que em média produz 0,70 peças a mais por hora.

Apesar da análise do intervalo de confiança indicar que esta diferença é significativa, esta corresponde a 1,6% ( $100 \cdot 0,7/45,1$ ) da produção esperada pela linearidade. Assim, considera-se que neste caso a célula trabalha próximo da linearidade entre a produção por hora e o número de operadores. Porém, cabe investigar as causas deste desvio, uma vez que estas podem atuar de modo mais intenso em outros casos, afastando a célula da linearidade.

Para investigar as causas deste desvio, observou-se a utilização dos operadores. Para o cenário do estado atual (três operadores), Tabela 7, observa-se um total de 119,64 segundos dedicados pelos três operadores às atividades de operação manual. Ainda, os três operadores dedicam 30,23 segundos aos deslocamentos e passam 9,75 segundos em espera. No cenário alternativo, Tabela 8, tem-se aproximadamente o mesmo tempo dedicado às atividades de operação manual, totalizando 119,51. Esta diferença deve-se ao uso de diferentes números aleatórios em cada cenário, já que em ambos cenários utilizaram-se as mesmas distribuições para os tempos de atividade manual. Já o tempo de movimentação foi alterado no cenário alternativo, devido aos novos deslocamentos dos operadores, passando, assim, para 33,23 segundos. O tempo de espera total estimado pela simulação para os três operadores foi reduzido para 4,45 segundos, em média, no cenário alternativo. Entre os fatores que contribuíram para a redução do tempo de espera dos operadores está a alteração do trabalho padrão, que proporcionou melhor distribuição de carga de trabalho entre os dois operadores. A distribuição de carga entre os operadores pode ser observada na Figura 27.

Tabela 7: Utilização dos operadores no cenário atual, caso 1.

<b>Operador</b>	<b>Operação</b>	<b>Movimentação</b>	<b>Espera</b>	<b>Total</b>
1	34,99	10,90	7,32	53,21
2	40,61	11,25	1,35	53,21
3	44,04	8,08	1,08	53,20
Total	119,64	30,23	9,75	159,62

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Tabela 8: Utilização dos operadores no cenário alternativo, caso 1.

<b>Operador</b>	<b>Operação</b>	<b>Movimentação</b>	<b>Espera</b>	<b>Total</b>
2	59,29	15,73	3,58	78,60
3	60,22	17,50	0,87	78,59
Total	119,51	33,23	4,45	157,19

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

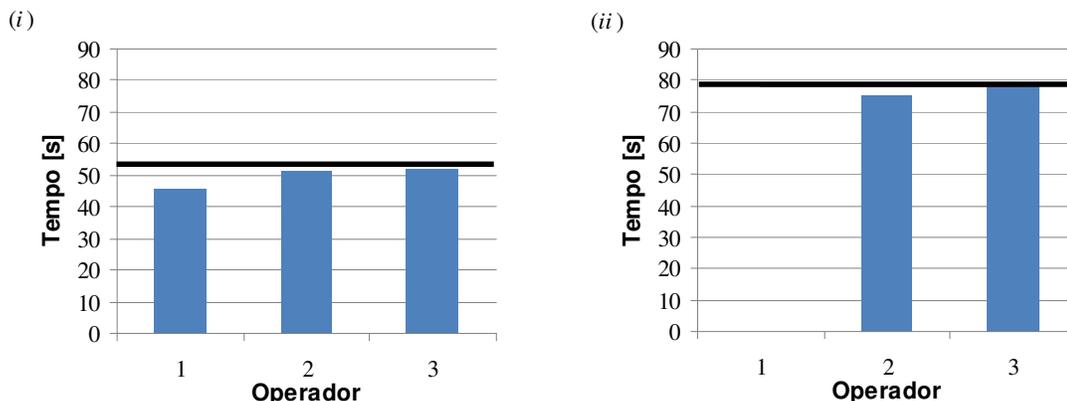


Figura 27: Gráfico de balanceamento dos operadores (i) cenário atual e (ii) cenário alternativo, caso 1.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Comparando-se os dois cenários, observa-se que o melhor balanceamento, no segundo cenário, promoveu uma redução de 5,30s no tempo total de espera ( $9,75 - 4,45$ ). Esta redução nas esperas viabiliza uma maior capacidade de produção no cenário alternativo, que na simulação resultou numa produção maior do que a esperada no cenário alternativo, compensando, inclusive, o aumento no tempo de deslocamento (que tende a reduzir a produção). Este potencial de ganho de produtividade apresentado pela simulação pode ser utilizado em casos de aumento da demanda. Se com três operadores, 93,89% do tempo de mão-de-obra ( $100 \cdot (119,64 + 30,23) / 159,62$ ) era gasto em operações manuais e deslocamentos, no cenário alternativo 97,17% ( $100 \cdot (119,51 + 33,23) / 157,19$ ) era gasto nestas atividades, indicando um ganho de 3,28% na utilização da mão-de-obra.

Estes resultados mostram-se coerentes com as informações obtidas em entrevista e observadas em documentos da empresa. Nestas ocasiões, foi citado que a linearidade da produção com relação ao número de operadores, condição desejada pela empresa, dependia do balanceamento de atividades entre os operadores. Assim, na condição atual da célula, cenário com três operadores, caso as atividades estivessem melhor balanceadas, a célula estaria mais próxima da linearidade.

Algumas considerações adicionais podem ser feitas a partir da experiência da empresa em relação à alteração no número de operadores. Historicamente, a célula em estudo trabalhou com 4 operadores, porém, após algumas atividades de melhoria, o trabalho padrão foi alterado para 3 operadores. Após esta alteração, a produção da célula manteve-se praticamente constante, apesar da redução no número de operadores. Neste processo de transformação, inicialmente houve resistência dos operadores, pois estes julgavam não poder manter a produção anterior sem um desgaste físico excessivo. Para verificar esta condição a

empresa trouxe operadores de outra célula e solicitou que seguissem o novo trabalho padrão. Como resultado, estes atingiram a meta estabelecida, aceitando o novo trabalho padrão. Isto sugere um aspecto relacionado ao condicionamento dos operadores, que pode afetar o desempenho da célula quando se altera a utilização dos operadores.

#### 4.2.2 Caso 2: Empresa B

Neste segundo caso, a empresa B está sediada na região metropolitana de Porto Alegre, contando com aproximadamente 1800 funcionários. Para este caso foram necessárias 15 visitas, com duração entre 4 a 5 horas.

##### 4.2.2.1 Descrição da célula: Empresa B

Nesta célula, a peça produzida é resultado de sucessivas operações de usinagem sobre uma peça forjada. A maior parte destas operações são realizadas pelos equipamentos, cabendo aos operadores as atividades de carga e descarga dos equipamentos e inspeção. Os componentes fabricados nesta célula pesam em torno de 0,3kg.

Esta célula é responsável pela fabricação de três famílias distintas, com *setup* na célula para alterar a família produzida. A família utilizada neste estudo corresponde à família de maior volume, aproximadamente 70% do volume de produção. Neste caso, a partir da entrevista, também foi constatada a existência de variações na demanda dos itens produzidos na célula, esta é administrada através da inclusão ou exclusão de famílias de produtos da célula.

Nesta célula, a peça fabricada é composta por duas partes, direita (D) e esquerda (E). Estas duas partes formam um conjunto que será montado na linha de montagem final e, portanto, são demandadas aos pares. Assim, as duas partes são fabricadas simultaneamente na célula, fornecendo lotes de igual quantidade para cada componente.

A célula é composta por 9 equipamentos, de E1 até E9, seis calhas deslizantes, C1 até C6, e três operadores, como pode ser visto na Figura 28. Os equipamentos E1 a E9 possuem ciclo automático, independente da presença do operador. As atividades de inspeção das peças ocorrem sobre uma bancada, B1 e B2, próxima aos equipamentos. Os operadores realizam suas atividades em pé e caminhando entre os postos de trabalho P1 a P9, também representados na Figura 28.

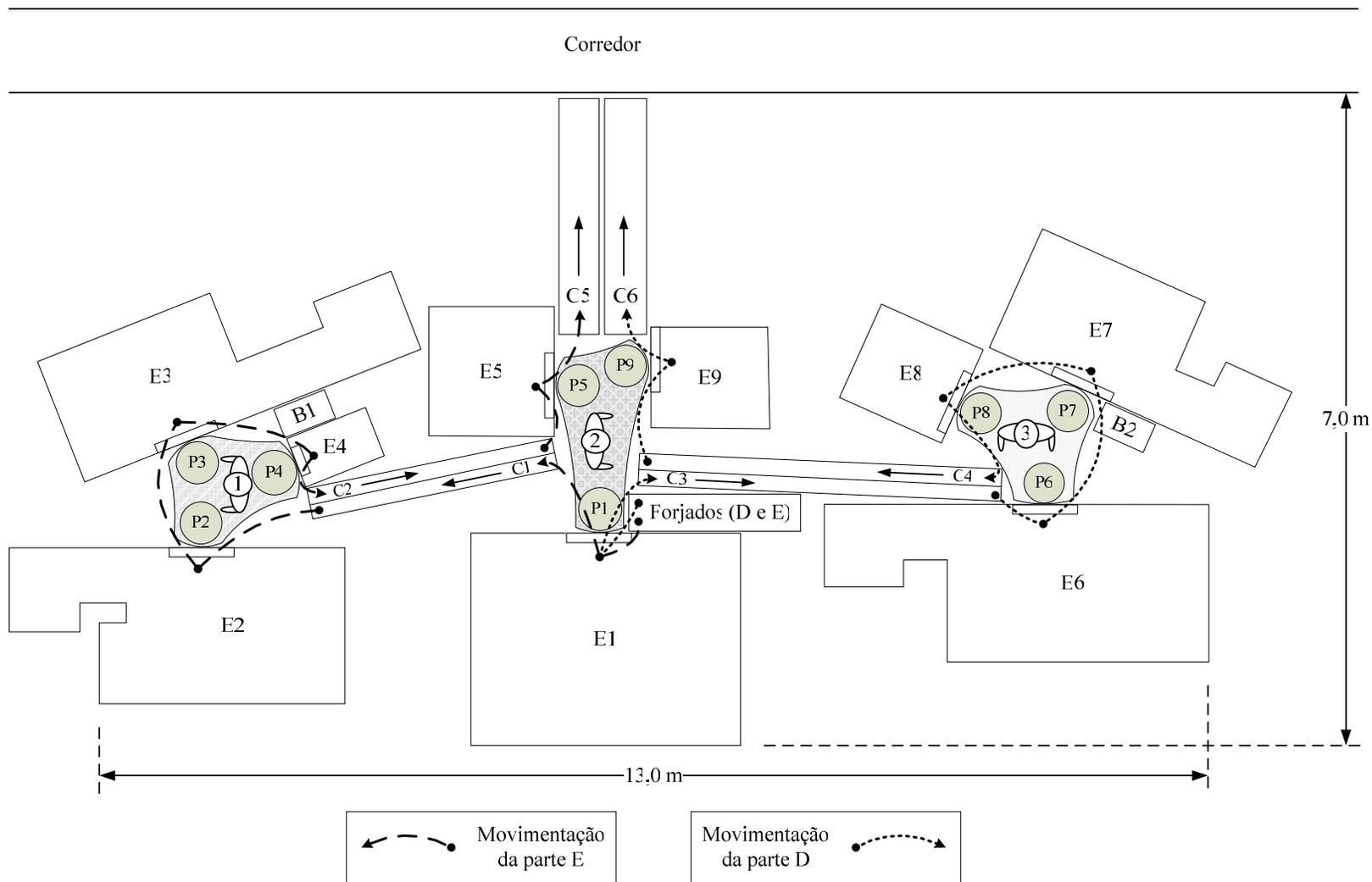


Figura 28: Representação esquemática da célula para o cenário atual (três operadores), caso 2.  
 Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

A movimentação das peças inicia com o segundo operador no posto P1. O equipamento E1 realiza a primeira operação em ambas partes, E e D. Este equipamento usina ao mesmo tempo uma parte E e uma parte D, que a partir deste ponto seguem por caminhos distintos na célula. A parte E é enviada pelo operador 2 para o operador 1 através da calha 1, e a parte D é enviada através da calha 3 para o operador 3. Após terem sido trabalhadas pelos respectivos operadores, estas peças retornam ao operador 2 através das calhas 2 e 4, respectivamente. A parte E segue para E5 e a parte D segue para E9. Em seguida cada parte é colocada na sua caixa. Estas, quando completamente preenchidas, são enviadas através das calhas 5 e 6 para o corredor de coleta de materiais.

O operador 1 é responsável pela operação de E2, E3 e E4. Seu ciclo inicia em P4, quando ele larga uma peça pronta, retirada de E4, na calha 2 e pega uma nova peça na calha 1. Com a peça na mão, ele desloca-se para a frente de E2. Em P2, o operador retira a peça usinada e coloca a peça trazida da calha 1. Após a carga, o operador aciona o ciclo automático do equipamento. Em seguida, o operador dirige-se para P3, onde realiza a descarga, carga e acionamento do ciclo automático de E3. Com a peça retirada de E3, o operador segue para P4. A peça já trabalhada por E4 é retirada e a peça vinda de E3 é colocada. Em seguida é acionado o ciclo automático de E4. A peça retirada do equipamento é colocada na calha 2 e uma nova peça vinda de E1 é retirada da calha 1, iniciando-se um novo ciclo.

O segundo operador possui um ciclo duplo, com o dobro da duração do tempo de ciclo dos demais operadores, iniciando em P1. O ciclo deste operador inicia ao retirar 1 peça do componente D e 1 peça do componente E da caixa de peças forjadas. Estas duas peças são colocadas no E1, após a retirada das duas peças trabalhadas no ciclo anterior. Após acionar o ciclo automático, o operador realiza a inspeção visual e coloca a parte E na calha 1 e a parte D na calha 3. Em seguida, o operador retira duas peças na calha 2, vindas do operador 1. Estas peças são trabalhadas no equipamento E5 e aguardam para serem colocadas na caixa da calha C5 em grupos de 5. Isto encerra a primeira parte do ciclo do operador 2, cuja duração corresponde a um ciclo dos demais operadores. Em seguida o operador 2 retorna para P1, onde retira mais 1 parte D e 1 parte E da caixa de forjado, retira do E1 as duas peças trabalhadas, coloca as peças vindas da caixa de forjado e aciona o equipamento. As peças trabalhadas, E e D, são colocadas nas calhas 1 e 3, respectivamente. Desta vez, o operador retira 2 partes da calha 4, vindas do operador 3. Estas duas partes são levadas para E9 e são trabalhadas. Após serem trabalhadas estas aguardam para serem colocadas na caixa da calha C6 também em grupos de 5. Isto encerra a segunda parte do ciclo do operador 2, cuja duração também corresponde a um ciclo dos demais operadores. Ainda, para cada lote de 50 peças,

tanto da parte E quanto da parte D, o operador deve preencher um cartão e colocar na caixa antes de liberar as peças. Os equipamentos E5 e E9 também possuem um ciclo automático, entretanto o operador permanece no posto de trabalho realizando outras atividades enquanto este ocorre.

O terceiro operador inicia seu ciclo no posto P6, ao retirar da calha 3 uma peça vinda do operador 2. Esta peça é colocada no E6, após retirar a peça trabalhada no ciclo anterior, e, então, o equipamento é acionado. Em seguida, o operador 3 segue de P6 para P7. Neste posto, de forma similar, é realizada a descarga, carga e acionamento do equipamento E7. O operador então segue de P7 para P8, onde a peça trabalhada por E8 é retirada e a peça trazida de E7 é colocada. Após acionar o equipamento, o operador segue para P6 com o item retirado de E8, onde coloca esta peça na calha C4 e retira uma nova peça de C3, iniciando um novo ciclo.

Além destas atividades que ocorrem a cada ciclo da célula existem atividades que fazem parte do trabalho padrão, porém ocorrem com menor frequência. Para todo equipamento existe um conjunto de medidas que devem ser verificadas na peça com certa frequência, visando assegurar a qualidade das peças produzidas. Os desvios nas dimensões das peças podem ser ocasionados pelo desgaste da ferramenta ou por variações na matéria-prima. Quando é necessário realizar a inspeção da peça, após acionar o ciclo automático de um equipamento e antes de dirigir-se ao próximo equipamento, o operador dirige-se para a bancada de medição e verifica as medidas da peça e, caso necessário, realiza as correções nos parâmetros do equipamento. Geralmente as peças ao serem inspecionadas estão com suas medidas entre a mínima e a máxima permitida, não necessitando retrabalhar as peças. Neste caso, os parâmetros do equipamento são corrigidos para ajustar as medidas para a medida nominal.

No caso do operador 1, a bancada de inspeção, B1, situa-se próxima ao posto P4, ver Figura 28. Assim, ao retirar uma peça de E2, o operador segue ao posto P4, mede a peça, realiza as correções necessárias nos parâmetros do equipamento e segue para o posto P3. Para as medidas referentes ao equipamento E3, o operador segue de P3 para P4, realiza as medições, corrige os parâmetros necessários e permanece em P4, pois E4 está ao lado da bancada de medição. Já para as medidas referentes à E4, o operador não deixa o posto P4, apenas vira-se para a bancada e realiza as medições. Após esta medição a peça é colocada em C2, uma nova peça é retirada de C1 e o operador dirige-se a P2.

Para o operador 2, os instrumentos de medição estão localizados sobre E1, E5 e E9. Deste modo, para as medidas de E1, E5 e E9, os equipamentos já estão localizados sobre os equipamentos, sendo necessário para algumas medidas o deslocamento entre E5 e E9.

A bancada de medição B2, utilizada pelo operador 3, está localizada próxima ao E7, ver Figura 28. Assim, para as medidas de E6, o operador desloca-se sobre o mesmo trajeto de P6 para P7, onde realizará as medições. Após as medições este já está em frente a E7, não necessitando deslocar-se. Para as medidas de E7, estas ocorrem no posto P7, também sem acréscimo no deslocamento. Para as medidas de E8, é utilizando apenas um instrumento de medição, localizado sobre E8. Dessa forma, para E8 também não são necessários deslocamentos adicionais.

Outro fator que altera o ciclo dos operadores é a necessidade de troca de inserto do equipamento. Neste caso existem dois tipos de troca, sem e com ajuste. Nas trocas sem ajuste o operador apenas realiza a troca do inserto e retorna ao ciclo normal, também não havendo a necessidade de retrabalhar a última peça produzida. Já nas trocas com ajuste, pode haver a necessidade de retrabalhar a última peça produzida, aumentando o tempo de troca.

Com relação ao funcionamento da célula, observa-se a formação de estoques sobre as calhas, principalmente sobre a calha 1, como consequência da baixa velocidade do equipamento E2. Pelo mesmo motivo, o operador 2 acaba por ficar sem peças para processar na calha 2. Quando isto ocorre este altera seu ciclo padrão, processando durante dois ou mais ciclos a parte D, retiradas da calha 4. Este estoque na calha 1 geralmente é processado no período de almoço, deslocando um operador de outro setor para a célula.

#### *4.2.2.2 Modelo conceitual: Empresa B*

Para a modelagem da célula foi seguido o mesmo procedimento do caso anterior. Este modelo tem como base a família de maior volume da célula, sem representar os tempos de *setup*. Procurou-se separar tanto quanto possível as atividades de operação manual das atividades de deslocamento, visando à realocação das atividades. Os tempos de operação manual e de deslocamento foram modelados com distribuições de probabilidade, e os tempos de ciclo automático dos equipamentos foram modelados através de valores determinísticos. A coleta de dados e as distribuições de probabilidades são apresentadas no próximo item.

A seguir são apresentadas a modelagem dos operadores com suas respectivas inspeções. A descrição da modelagem da troca de inserto será apresentada após a descrição do terceiro operador. Para o operador 1 foram definidas 4 atividades de operação manual e 3 de deslocamento, apresentadas na Figura 29. Estas atividades representam o trabalho padrão para um ciclo sem inspeção ou troca de inserto.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op1Mov1	Mover-se de P4 até P2.	1,85"	-
2	Op1At1	Retirar a peça do E2 e colocar a peça vinda da canaleta 1. Acionar E2.	3,87"	50,6"
3	Op1Mov2	Mover-se de P2 até P3.	2,86"	-
4	Op1At2	Retirar a peça do E3 e colocar a peça vinda do E2. Acionar E3	4,10"	45,3"
5	Op1Mov3	Mover-se P3 até P4	2,52"	-
6	Op1At3	Retirar a peça de E4 e colocar a peça vinda do E3. Acionar E4.	4,08"	16,2"
7	Op1At4	Largar a peça retirada de E4 na canaleta 2 e pegar uma peça na canaleta 1.	2,79"	-
<b>Total</b>			<b>22,1"</b>	<b>112"</b>

Figura 29: Atividades do operador 1, caso 2.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para a modelagem das inspeções foi realizado o procedimento apresentado a seguir. Foi definido para cada equipamento, de acordo com o número de medidas necessárias e sua frequência, o número de peças produzidas entre duas medições. Por exemplo, para o equipamento E3 é necessário verificar 5 características, com intervalos de meia hora entre duas medidas da mesma característica, dessa forma tem-se uma medição a cada 6 minutos (30 dividido por 5). Assim, mantendo a seqüência das características medidas, a cada meia hora repete-se a medição da mesma característica. Dividindo-se este valor (6 minutos) pelo tempo de ciclo da célula (60 segundos) tem-se o número de peças produzidas entre duas medições (6 peças). Foi gerado um modelo representativo das inspeções, independentemente da característica medida. Ainda, para cada número de peças definido, foi modelada uma variabilidade de uma peça a mais ou a menos entre duas medições, com igual probabilidade entre as três opções. Acrescentou-se esta variabilidade pois o operador define quando será feita a medida, nem sempre respeitando de forma exata o intervalo definido.

Quando houver necessidade de inspeção de E2, a atividade Op1Mov2, Figura 29 (#3), será substituída pelas atividades número 8, 9 e 10, apresentadas na Figura 30. A frequência das medições para E2 é de uma a cada quatro peças. Para a inspeção de E3, será acrescentada a atividade Op1Ins2, Figura 30 (#11), após a atividade Op1Mov3, Figura 29 (#5). Neste caso, uma a cada seis peças deve ser inspecionada. Para a inspeção de E4, será substituída a atividade Op1At4, Figura 29 (#7), pela atividade Op1Ins3, Figura 30 (#12), sendo definido para este equipamento uma inspeção a cada quatorze peças.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
8	Op1Mov4	Mover-se de P2 até P4.	3,23"	-
9	Op1Ins1	Inspecionar a peça retirada do E2.	7,47"	-
10	Op1Mov5	Mover-se P4 até P3.	1,77"	-
11	Op1Ins2	Inspecionar a peça retirada de E3.	11,6"	-
12	Op1Ins3	Inspecionar a peça retirada do E4. Largar a peça retirada do E4 na canaleta 2 e pegar uma peça na canaleta 1.	13,2"	-
<b>Total</b>			<b>37,2"</b>	<b>0,0"</b>

Figura 30: Atividades de inspeção do operador 1, caso 2.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para o operador 2 foram definidas 7 atividades de operação manual e 2 de deslocamento, apresentadas na Figura 31. Estas atividades representam o trabalho padrão para um ciclo sem inspeção ou troca de inserto. O ciclo duplo deste operador pode ser percebido nas atividades de número 1 à 6, e nas atividades de número 7 à 12, correspondendo aos ciclos alternados de processamento das partes E e D, respectivamente.

Idealmente, o operador 2 deveria trabalhar alternadamente com as partes D e E. Entretanto, na prática isto não ocorre pois o operador nem sempre encontra duas peças na calha (2 ou 4) para serem processadas. Neste caso, não encontrando duas peças para processar, este procurará duas peças na mesma calha do ciclo anterior. Caso nesta também não tenham peças disponíveis, este retornará para o posto P1, produzindo mais duas peças. O operador só cessa a produção de peças caso atinja o limite de peças nas calhas 1 e 3, definido em 20 peças por calha, semelhante ao sistema real.

Este ciclo base é complementado pelas atividades relacionadas à formação de lotes. No posto 5, a cada 5 peças o operador além de laminar as peças deve colocá-las na caixa, assim substitui-se a atividade Op2At5, Figura 31 (#5), pela atividade Op2At8, Figura 32 (#13). Ainda, com 45 peças na caixa o operador deve acrescentar o tempo de preenchimento do cartão de liberação, atividade Op2At9, Figura 32 (#14). E com 50 peças na caixa, o operador deve realizar uma inspeção visual e liberar o lote produzido, Op2At10, Figura 32 (#15). De forma semelhante, em P9, a cada 5 peças o operador além de laminar as peças deve colocá-las na caixa, assim substitui-se a atividade Op2At7, Figura 31 (#11), por Op2At11, Figura 32 (#16).

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op2At1	Em P1, pegar duas peças forjadas, uma D e outra E.	2,54"	-
2	Op2At2	Retirar a peça de E1 e colocar a peça forjada. Acionar E1.	8,26"	43,1"
3	Op2At3	Inspecionar visualmente e largar peças retiradas do E1 (durante o deslocamento de P1 até P5).	8,38"	-
4	Op2At4	Pegar 2 peças na canaleta 2.	2,89"	-
5	Op2At5	Laminar as peças em E5. Fazer a rebarbação e colocar as peças para aguardar.	18,5"	-
6	Op2Mov1	Mover-se de P5 até P1	2,23"	-
7	Op2At1	Em P1, pegar duas peças forjadas, uma D e outra E.	2,54"	-
8	Op2At2	Retirar a peça de E1 e colocar a peça forjada. Acionar E1.	8,26"	43,1"
9	Op2At3	Inspecionar visualmente e largar peças retiradas do E1 (durante o deslocamento de P1 até P9).	8,38"	-
10	Op2At6	Pegar 2 peças na canaleta 4.	3,01"	-
11	Op2At7	Laminar as peças em E9. Fazer a rebarbação e colocar as peças para aguardar.	13,6"	-
12	Op2Mov2	Mover-se de P9 até P1	2,00"	-
<b>Total</b>			<b>80,7"</b>	<b>86,2"</b>

Figura 31: Atividades do operador 2, caso 2.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
13	Op2At8	Laminar as peças em E5. Com cinco peças aguardando, fazer a inspeção visual e colocar na caixa.	23,8"	-
14	Op2At9	Com 45 peças na caixa preencher o cartão.	49,6"	-
15	Op2At10	Ao completar 50 peças na caixa, fazer a inspeção visual e liberar o lote.	17,5"	-
16	Op2At11	Laminar as peças em E9. Com cinco peças aguardando, fazer a inspeção visual e colocar na caixa.	17,3"	-
17	Op2Ins1	Inspecionar as peças retiradas de E1.	6,08"	-
18	Op2Ins2	Laminar duas peças e inspecionar uma das peças trabalhadas em E5.	30,9"	-
19	Op2Ins3	Laminar duas peças e inspecionar uma das peças trabalhadas em E9.	30,3"	-
<b>Total</b>			<b>175"</b>	<b>0,0"</b>

Figura 32: Atividades de lote e inspeção do operador 2, caso 2.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para a inspeção das operações de E1 é acrescentada a atividade Op2Ins1, Figura 32 (#17), após a atividade Op2At3, Figura 31 (#3 e #9). Para este equipamento está definida uma inspeção a cada trinta peças. No posto 5, o operador realiza a inspeção substituindo Op2At5 por Op2Ins2 com uma inspeção a cada vinte peças. No posto 9, o operador realiza a inspeção substituindo a Op2At7 por Op2Ins3, inspecionando uma a cada dez peças.

Para o operador 3 foram definidas 4 atividades de operação manual e 3 de deslocamento, apresentadas na Figura 33. Estas atividades representam o trabalho padrão para um ciclo sem inspeção ou troca de inserto. Para este operador serão acrescentadas três atividades, Figura 34, correspondente à inspeção dos equipamentos E6, E7 e E8. A atividade Op3Ins1 será acrescentada após a atividade número 3, Figura 33, a atividade Op3Ins2, após a atividade número 4, e a atividade Op3Ins3 após a atividade número 6. Para estas inspeções está definida uma frequência de quatro (E6), quinze (E7) e quarenta e quatro (E8) peças.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op3At1	Em P6, largar a peça retirada da E8 na canaleta 4 e pegar uma peça na canaleta 3.	2,43"	-
2	Op3At2	Retirar a peça do E6 e colocar a peça vinda da canaleta 3. Acionar E6.	3,69"	49,9"
3	Op3Mov1	Mover-se de P6 até P7.	2,38"	-
4	Op3At3	Retirar a peça do E7 e colocar a peça vinda do E6. Acionar E7.	5,55"	46,6"
5	Op3Mov2	Mover-se P7 até P8.	2,70"	-
6	Op3At4	Retirar a peça do E8 e colocar a peça vinda do E7. Acionar E8.	4,28"	19,8"
7	Op3Mov3	Mover-se de P8 até P6.	3,12"	-
<b>Total</b>			<b>24,2"</b>	<b>116"</b>

Figura 33: Atividades do operador 3, caso 2.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
8	Op3Ins1	Inspeccionar a peça retirada do E6	9,33"	-
9	Op3Ins2	Inspeccionar a peça retirada do E7	8,83"	-
10	Op3Ins3	Inspeccionar a peça retirada do E8	6,01"	-
<b>Total</b>			<b>24,2"</b>	<b>0,0"</b>

Figura 34: Atividade de inspeção do operador 3, caso 2.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

O último aspecto a ser modelado foi a troca de inserto dos equipamentos. Esta foi modelada como uma atividade do operador, sendo contabilizada como tempo de operação manual. Foram modelados os dois tipos de troca, seguindo a descrição do processo real. Como a troca de inserto é proporcional ao desgaste da ferramenta, o tempo entre trocas está em função do número de peças processadas. A distribuição de probabilidade para cada ferramenta é apresentada e discutida no item referente à coleta de dados.

No caso 2, ao longo do estudo pôde ser percebido que o processo real só chegava a trabalhar em regime permanente nas últimas horas do turno. Então, neste modelo, serão utilizadas medidas do período transiente do sistema. Este regime transiente é observado pela não estabilização do estoque existente entre os operadores, diferentemente do caso anterior. Dessa forma, para avaliar o sistema será simulado um período correspondente a um turno de trabalho. Para determinar o tempo de simulação correspondente a um turno de trabalho, o tempo total disponível no turno foi ajustado à escala do modelo. Dessa forma obtêm-se um tempo de simulação de 12 horas e 53 minutos.

Com relação à condição inicial do sistema real, este começa com todos os equipamentos sem peças. Porém, no modelo este iniciará com uma peça em cada equipamento (exceto E5 e E9) para que o operador possa executar sua rotina, além de duas peças em cada calha. Por este motivo foram descontados oito minutos do tempo disponível para a produção das peças, referente aos oito ciclos necessários para produzir o estoque inicial do sistema (pois as partes E e D movem-se em paralelo). Assim, o período correspondente a um turno de trabalho no modelo é de 12 horas e 45 minutos.

Assim como no caso anterior, a medida utilizada para avaliar o desempenho da célula é a produção média por hora. Neste caso, a produção considerada foi apenas das peças prontas colocadas na caixa, em lotes de cinco peças. As peças prontas que aguardavam a formação do lote e inspeção final não foram contabilizadas nesta estimativa. Ainda, esta produção refere-se ao par composto das partes D e E. Logo, as peças que não possuíam um par correspondente do outro tipo também não foram consideradas.

#### *4.2.2.3 Coleta de dados: Empresa B*

Neste caso, a coleta de dados assumiu alguns pressupostos semelhantes ao caso 1. Considerou-se não haver diferenças significativas com relação aos dias da semana. Também, neste caso, os dados utilizados dizem respeito a apenas um dos turnos de trabalho na empresa. Neste caso foram observadas pequenas paradas de funcionamento, como no caso 1, porém

com menor frequência. A maior parte dos dados foi coletada pelo próprio pesquisador a partir da observação direta do funcionamento da célula. As características que não eram possíveis de serem coletadas deste modo foram estimadas pelo operador líder da célula.

O tamanho de amostra definido neste caso é semelhante ao caso anterior. Neste caso observou-se um tempo real médio para as atividades a serem coletadas de 7 segundos. Para o cálculo do tamanho de amostra considerou-se uma confiança de 95% ( $z = 1,96$ ), um erro de 0,7 segundos e um desvio padrão de 2,7 segundos. Para estes valores obteve-se um tamanho de amostra de 57,2, arredondado para 65 em função da possível eliminação de alguns pontos. Observa-se, neste caso, que em função do tempo médio de cada atividade ser maior aceitou-se um erro amostral maior, assim como uma maior variabilidade na amostra (em valores absolutos). Ainda, o tempo de processamento dos equipamentos foi representado pela média de cinco observações, semelhante ao caso anterior, Tabela 9. Os dados utilizados para gerar as distribuições, assim como para gerar a média do tempo de processamento dos equipamentos, estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 9: Tempo de ciclo automático por equipamento, caso 2.

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E6</b>	<b>E7</b>	<b>E8</b>
Média	43,08	50,63	45,28	16,18	49,89	46,62	19,80

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Somente para as atividades do operador 2 não foi possível atingir o tamanho de amostra desejado (65), sendo obtido amostras de tamanho 45 ou 15 para as atividades, que correspondem a uma confiança de 92% e 68%, respectivamente. Isto se deve ao tempo de ciclo mais longo deste operador e a baixa frequência com que certas atividades ocorrem.

Para a coleta dos tempos de inspeção foi solicitado ao operador que realizasse a inspeção a todo o ciclo, permitindo a coleta de uma amostra maior. Isto pode ter reduzido a proporção de inspeções com ajuste de parâmetros, visto que a proximidade entre duas inspeções reduz a probabilidade de observação de uma alteração nas características inspecionadas. Entretanto, este procedimento foi necessário para viabilizar a estimativa do tempo de inspeção na célula.

Para cada uma das atividades foi ajustada uma distribuição de probabilidade utilizando os testes K-S e A-D para avaliar o ajuste. As distribuições obtidas para cada atividade do operador 1 estão apresentadas na Tabela 10, junto com os resultados dos testes de ajuste. Na coluna destes testes (K-S e A-D) são apresentados os valores de  $p$  obtidos para o ajuste, lembrando que se espera que a hipótese nula de correspondência entre os dados e a

Tabela 10: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades do operador 1, caso 2.

Atividade	Distribuição teórica	Expressão	Média	K-S	A-D
Op1Mov1	Log-logistic	$0,198+1,46*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/3,70)$	1,85	0,974	0,987
Op1At1	Log-logistic	$-3,96+7,79*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/16,7)$	3,87	0,256	0,380
Op1Mov2	Log-logistic	$0,746+2,04*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/7,17)$	2,86	0,804	0,943
Op1At2	Log-logistic	$-45,2+49,3*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/108)$	4,10	0,560	0,426
Op1Mov3	Pearson 5	0,965+P5(9,48; 13,2)	2,52	0,940	0,916
Op1At3	Log-logistic	$2,01+1,81*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/3,58)$	4,08	0,770	0,694
Op1At4	Log-logistic	$0,498+1,53*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/2,11)$	2,79	0,990	0,988
Op1Mov4	Log-logistic	$1,59+1,49*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/4,24)$	3,23	0,760	0,925
Op1Ins1	Log-logistic	$3,48+3,44*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/3,39)$	7,47	0,976	0,969
Op1Mov5	Log-logistic	$-0,083+1,77*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/6,08)$	1,77	0,985	0,991
Op1Ins2	Pearson 6	4,22+P6(1,98; 8,29; 27,1)	11,6	0,807	0,066
Op1Ins3	Log-logistic	$-102+115*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/48,7)$	13,1	0,796	0,846

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

distribuição ajustada não seja rejeitada. Assim, para uma confiança de 95%, valores de  $p$  maiores do que 0,05 indicam a adequação do ajuste realizado. A atividade mais próxima do limite de rejeição foi Op1Ins2, com um valor de  $p$  igual a 0,066 para o teste A-D, porém com um valor de  $p$  de 0,807 para o teste K-S, justificando sua aceitação.

Para o operador 2 foram coletadas amostras de tamanho 45 ou 15 para ajustar as distribuições apresentadas na Tabela 11. A probabilidade de  $p$  para cada um dos testes é apresentada na mesma tabela, nas colunas dos testes K-S e A-D. Novamente, em alguns casos o teste A-D esteve próximo ao limite, porém não em conjunto com os valores de  $p$  para o K-S.

Tabela 11: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades do operador 2, caso 2.

Atividade	Distribuição teórica	Expressão	Média	K-S	A-D
Op2At1	Beta	B(1,29; 3,36; 1,06; 6,39)	2,54	0,868	0,056
Op2At2	Weibul	4,34+W(3,43; 4,36)	8,26	0,817	0,873
Op2At3	Log-logistic	$-2,89+11,0*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/8,08)$	8,38	0,972	0,943
Op2At4	Log-logistic	$0,906+1,92*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/7,13)$	2,89	0,618	0,883
Op2Mov1	Log-logistic	$0,732+1,37*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/4,29)$	2,23	0,757	0,831
Op2At6	Weibul	0,688+W(3,47; 2,58)	3,01	0,858	0,905
Op2Mov2	Pearson 6	0,750+P6(3,96; 2,66E+3; 836)	2,00	0,962	0,060
Op2At5*	Pearson 6	15,5+P6(1,26; 2,86E+4; 7,33E+4)	18,5	0,736	0,061
Op2At7*	Lognormal	-739+L(752; 1,91)	13,6	0,981	0,981
Op2Ins1*	Log-logistic	$0,452+5,39*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/6,16)$	6,08	0,998	0,997
Op2At8*	Pearson 6	19,1+P6(6,96; 3,48; 1,67)	23,8	0,532	0,053
Op2Ins2*	Inversa Gaussiana	22,7+IG(14,1; 8,22)	30,9	0,986	0,998
Op2At11*	Weibul	9,41+W(4,64; 8,63)	17,3	0,771	0,906
Op2Ins3*	Weibul	-116+W(36,9; 149)	30,3	0,222	0,438
Op2At9*	Weibul	1,22+W(8,06; 51,3)	49,6	0,979	0,979
Op2At10*	Pearson 5	11,5+P5(3,04; 12,2)	17,5	0,999	0,997

\* Atividades com tamanho de amostra igual a 15. Demais atividades tamanho de amostra igual a 45.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para as atividades do terceiro operador foram obtidas as distribuições apresentadas na Tabela 12, todas com tamanho de amostra de 65. Os resultados dos testes K-S e A-D, valores de  $p$  para estas atividades, são apresentados na mesma tabela. Com relação à qualidade do ajuste, casos semelhantes aos discutidos para os operadores 1 e 2 podem ser observados para este operador.

Tabela 12: Distribuições de probabilidade ajustadas as atividades do operador 3, caso 2.

Atividade	Distribuição teórica	Expressão	Média	K-S	A-D
Op3At1	Pearson 6	$0,740+P6(1,40; 10,7; 11,7)$	2,43	0,948	0,058
Op3At2	Log-logistic	$-31,9+35,5*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/71,3)$	3,69	0,945	0,924
Op3Mov1	Log-logistic	$1,33+0,909*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/3,38)$	2,38	0,751	0,053
Op3At3	Log-logistic	$2,33+3,12*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/7,32)$	5,55	0,985	0,061
Op3Mov2	Log-logistic	$-0,651+3,28*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/8,81)$	2,70	0,972	0,987
Op3At4	Log-logistic	$-2,38+6,63*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/21,7)$	4,28	0,889	0,988
Op3Mov3	Weibul	$0,445+W(1,22; 2,86)$	3,12	0,798	0,553
Op3Ins1	Erlang	$3,48+ER(5,85; 2,93)$	9,33	0,892	0,849
Op3Ins2	Erlang	$4,90+ER(3,93; 1,31)$	8,83	0,996	0,997
Op3Ins3	Lognormal	$-747+L(753; 1,86)$	6,01	0,640	0,619

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para o tempo de troca de inserto foi realizada uma coleta sobre o equipamento E2 e, a partir destes valores, utilizou-se a mesma distribuição para os demais equipamentos. Foram coletadas amostras de tamanho 10 para os tempos de troca sem e com ajuste. As distribuições obtidas e o resultado dos testes K-S e A-D são apresentados nas Tabela 13.

Tabela 13: Distribuições de probabilidade ajustadas a troca de inserto, caso 2.

Ajuste	Distribuição teórica	Expressão	Média	K-S	A-D
Sem	Exponencial	$93,3+E(10,5)$	103,78	0,947	0,091
Com	Inversa Gaussiana	$306+IG(20,6; 30,9)$	337,36	0,983	0,982

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Com relação à frequência da troca de insertos, estes valores foram estimados pelo operador líder da célula. Para cada ferramenta foi definido um intervalo para a vida útil, correspondendo ao número de peças que a ferramenta normalmente produz, apresentados na Tabela 14. A partir destes valores foram definidos os parâmetros da distribuição uniforme utilizada no modelo computacional.

Com relação aos dados necessários à validação do sistema, para este caso foram coletadas 5 amostras do total de itens produzidos em um turno. Como se optou por modelar a situação onde a célula operava sem auxílio do operador externo, os dados da validação foram coletados sob esta condição. Estes são apresentados no item referente à validação do modelo.

Tabela 14: Característica das trocas de inserto por equipamento, caso 2.

<b>Equipamento</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Ajuste</b>	<b>Limite inferior</b>	<b>Limite superior</b>
E1	1.A	Com	335	375
E2	2.A	Sem	100	140
	2.B	Com	110	150
E3	3.A	Com	125	155
E6	6.A	Sem	130	150
	6.B	Com	160	200
E7	7.A	Sem	680	740
	7.B	Com	120	160

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#### 4.2.2.4 Modelo computacional: Empresa B

A partir do modelo conceitual apresentado no item 4.2.2.2, foi construído um modelo computacional para simular o comportamento deste modelo. O processo de construção deste modelo passou pela construção de modelos intermediários até a representação completa do modelo desejado. No Apêndice B, juntamente com o código programado, encontra-se a descrição deste processo de implementação computacional. Neste caso, como não está sendo avaliado o regime permanente do sistema, não foi necessário definir o período de *warm-up*.

#### 4.2.2.5 Validação do modelo: Empresa B

A validação do modelo foi realizada com base na produção total de um turno de trabalho. Foram coletadas 5 amostras da produção total de um turno, conforme apresentado no item 4.2.2.3. Destas cinco amostras apenas quatro puderam ser utilizadas para a validação do modelo. A amostra rejeitada apresentou uma produção muito abaixo do esperado devido à parada de uma das máquinas, fator que não está sendo modelado. Estas amostras foram confrontadas com 4 replicações independentes com duração de um turno de trabalho. Os valores das amostras do sistema real,  $P_r$ , e das estimativas do modelo,  $P_m$ , são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Validação do modelo atual, caso 2.

<b>Replicação</b>	<b><math>P_r</math></b>	<b><math>P_m</math></b>	<b><math>P_m - P_r</math></b>
1	766	760	-6
2	742	760	18
3	766	770	4
4	732	760	28
Média	751,50	762,50	11,00
Desvio Padrão	17	5	15
Erro (3gl, 95%)	20,28	5,88	17,66

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para a diferença entre  $P_m$  e  $P_r$ , foi construído o intervalo de confiança  $t$  de 95% com 3 graus de liberdade ( $t = 2,353$ ). Para este intervalo foi obtido um limite superior de 28,66 e um limite inferior de -6,66. A partir dos limites obtidos conclui-se que o modelo possui um comportamento representativo do sistema real, pois este intervalo contém o valor zero. A representatividade para a produção total sugere que este modelo também é representativo para a produção por hora, medida utilizada na avaliação da linearidade da mão-de-obra.

#### 4.2.2.6 Cenário alternativo: Empresa B

Após a validação do modelo programado iniciou-se a construção do cenário alternativo. Este cenário é a representação do trabalho padrão para dois operadores definido pela empresa. O trabalho padrão para dois operadores não é utilizado de modo permanente contra variações na demanda devido ao desgaste físico gerado, julgado acima do limite aceitável.

Com relação à linearidade da produção com relação ao número de operadores, neste caso foi possível obter uma estimativa empírica desta relação, uma vez que a célula possui experiência com a variação no número de operadores. A estimativa realizada pelo supervisor para a produção por hora da célula com dois operadores correspondente a uma redução de 40% na produção de peças por hora com três operadores. Observa-se, neste caso, uma redução na produção maior do que o esperado pela linearidade (33%).

Neste cenário alternativo, o trabalho do segundo operador é dividido entre os operadores 1 e 3, ilustrado na Figura 35. O ciclo do operador 1 inicia em P1, onde retira uma peça pronta D e uma peça pronta E de E1 e coloca duas novas peças no equipamento. Em seguida, a parte D é colocada na calha C3 e a parte E é colocada na calha C1. Na seqüência, o operador 1 retira duas peças na calha C2 e desloca-se para P5, onde realiza as atividades do posto para um par de peças E. Após tais atividades, o operador desloca-se para P4, onde pega a parte E colocada na calha C1 no início do ciclo. Neste momento o operador 1 realiza a mesma seqüência do trabalho padrão para três operadores, descarregando, carregando e acionando E2, E3 e E4, ver Figura 35. A peça pronta retirada de E4 é enviada pela calha C2. Em seguida o operador 1 retira uma peça da calha C1, enviada pelo operador 3, e realiza uma segunda repetição do trabalho padrão para três operadores, passando novamente por P2, P3 e P4, descarregando, carregando e acionando os equipamentos. Novamente, a peça retirada de E4 é colocada na calha C2, e o operador retorna para P1, iniciando um novo ciclo. Estas duas peças enviadas pelo operador 1 serão trabalhadas por ele quando este chegar a P5.



O operador 3 possui ciclo semelhante, iniciando também em P1. Após pegar duas peças na caixa de forjado, o operador retira as peças prontas em E1 e coloca as duas peças retiradas da caixa e aciona o equipamento E1. A parte E é enviada ao operador 1 através da calha C1 e a parte D é colocada na calha C3. Em seguida o operador 3 retira duas peças na calha C4, e segue para P9, onde trabalha o par de partes D. Terminadas as atividades de P9, este segue para P6. Em P6 inicia-se a mesma seqüência realizada no trabalho padrão para três operadores, passando por P6, P7 e P8. A peça retirada de E8 é colocada na calha C4. Em seguida o operador 3 retira uma peça da calha C3, enviada pelo operador 1, e repete o trabalho padrão para três operadores. A nova peça retirada de E8 é colocada na calha C4 e o operador 3 segue para P1, iniciando um novo ciclo.

As inspeções e trocas de insertos seguem os mesmos padrões definidos anteriormente. Apenas os tempos de deslocamento apresentados na Figura 36 foram acrescentados. Estes foram definidos do mesmo modo que no caso anterior, através de uma relação linear em função da distância. Para o operador 1, foi acrescentado o deslocamento entre P4 e P1, Figura 36 (#1), obtido multiplicando-se o tempo de Op2Mov1 (2,23s), Figura 31, pela nova distância percorrida (3,8m) e dividido pela distância percorrida anteriormente (1,7m). Na figura o posto sobrescrito é o posto substituído no deslocamento. A atividade Op2Mov1 também serviu como base para a modelagem do deslocamento entre P5 e P4, Figura 36 (#2), realizado pelo mesmo operador. Nesta situação, a nova distância a ser percorrida é de 5,6 metros.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op2Mov1'	Mover-se de ( <del>P5</del> ) P4 até P1	4,98"	-
2	Op2Mov1"	Mover-se de P5 até ( <del>P4</del> ) P4	7,35"	-
3	Op2Mov2'	Mover-se de ( <del>P9</del> ) P6 até P1	6,82"	-
4	Op2Mov2"	Mover-se de P9 até ( <del>P4</del> ) P6	6,94"	-
<b>Total</b>			<b>26,1"</b>	<b>0,0"</b>

Figura 36: Atividades de movimentação do cenário alternativo, caso 2.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para o operador 2, foi acrescentado o deslocamento entre P6 e P1, Figura 36 (#3). O tempo para realizar este deslocamento foi estimado multiplicando-se o tempo de Op2Mov2

(2,00 s), Figura 31, pela nova distância percorrida (5,8m) e dividido pela distância percorrida anteriormente (1,7 m). A atividade Op2Mov2 também serviu como base para a modelagem do deslocamento entre P9 e P6, Figura 36 (#4), cuja distância é de 5,9 metros.

Com relação à duração da simulação do cenário alternativo, foram descontados 9 minutos referentes ao estoque inicial, totalizando um tempo de simulação de 12 horas e 44 minutos. Para calcular o tempo a ser descontado foi multiplicado o número de peças de cada tipo do estoque inicial, seis peças neste caso, pelo tempo de ciclo médio esperado, 90 segundos. Após a definição do funcionamento da célula para dois operadores este modelo foi programado e verificado.

Para avaliar a validade do cenário alternativo foi verificada a correspondência entre o trabalho padrão e as atividades modeladas. Também foi verificado o cumprimento de todas as atividades de processamento necessárias à fabricação de uma peça, na sua ordem exata. Confrontando os resultados obtidos na simulação, apresentados na Tabela 16 coluna  $P_{2op}$ , com a estimativa realizada na entrevista, observou-se uma divergência com relação ao rendimento da célula. Na entrevista foi estimada uma redução de 40% na produção por hora da célula com dois operadores, correspondendo a aproximadamente 36 peças/hora, contra aproximadamente 44 peça/hora obtidas na simulação do cenário alternativo. Ainda, foi citado na entrevista que o trabalho padrão para dois operadores era considerado muito desgastante, e por esta razão não era utilizado com frequência. Estas informações sugerem que o desgaste físico dos operadores, devido ao aumento da distância percorrida por ciclo, seja fator influente nos resultados da alteração do número de operadores. Entretanto, este fator não foi modelado devido à impossibilidade de observação e, conseqüentemente, de mensuração do desgaste físico dos operadores.

Devido à forma de construção deste cenário, como uma alteração do cenário atual validado, considerou-se que este cenário é representativo de uma situação em que os operadores estariam preparados para esta nova condição de trabalho, desprezando-se o desgaste físico dos mesmos. Ainda, como o objetivo deste cenário é avaliar o desempenho relativo entre os cenários, visando à identificação dos efeitos na alteração do número de operadores, a análise do modelo alternativo simulado pode auxiliar na identificação de efeitos também presentes no sistema real, mesmo que este modelo não possua precisão na estimativa da produção por hora. Sob estas considerações, este cenário foi utilizado para a análise da linearidade da mão-de-obra.

#### 4.2.2.7 Análise da linearidade da mão-de-obra: Empresa B

Após a construção do cenário alternativo foram geradas as rodadas válidas para 20 replicações de cada um dos cenários. Os resultados obtidos para a produção por hora no cenário atual ( $P_{3op}$ ) e no cenário alternativo ( $P_{2op}$ ) são apresentados na Tabela 16. Também são apresentados nesta tabela os valores esperados para o cenário alternativo caso a hipótese de linearidade seja verdadeira ( $\hat{P}_{2op}$ ), assim como a diferença entre  $P_{2op}$  e  $\hat{P}_{2op}$ .

Tabela 16: Produção por hora obtida para 3 e 2 operadores, caso 2.

Replicações	$P_{3op}$	$\hat{P}_{2op}$	$P_{2op}$	$P_{2op} - \hat{P}_{2op}$
1	59,24	39,49	44,30	4,81
2	59,63	39,75	44,30	4,55
3	60,02	40,02	44,70	4,68
4	58,85	39,23	43,91	4,68
5	59,63	39,75	43,91	4,16
6	60,02	40,02	44,70	4,68
7	59,63	39,75	43,91	4,16
8	59,63	39,75	44,70	4,94
9	59,63	39,75	43,91	4,16
10	59,24	39,49	44,30	4,81
11	58,85	39,23	43,52	4,29
12	59,63	39,75	44,70	4,94
13	59,24	39,49	44,30	4,81
14	60,02	40,02	43,91	3,90
15	59,63	39,75	44,30	4,55
16	59,63	39,75	44,30	4,55
17	59,63	39,75	43,13	3,37
18	59,63	39,75	44,30	4,55
19	59,24	39,49	43,91	4,42
20	59,63	39,75	43,91	4,16
Média	59,53	39,69	44,15	4,46
Desvio Padrão	0,33	0,22	0,41	0,39
Erro (19gl, 95%)	0,13	0,09	0,16	0,15

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Neste caso, assim como no anterior, para avaliar a necessidade de um maior número de replicações avaliou-se a representatividade do erro obtido nos dois cenários. Para tanto, calculou-se o erro para 95% de confiança ( $t = 1,729$ ), apresentado na Tabela 16. Neste caso, obteve-se um erro percentual de 0,22% ( $100 \cdot 0,13/59,53$ ) para  $P_{3op}$  e de 0,36% ( $100 \cdot 0,16/44,15$ ) para  $P_{2op}$ . Novamente, julgou-se desnecessária a coleta de mais replicações.

Também semelhante ao caso anterior, foi calculado o intervalo de confiança para ( $P_{2op} - \hat{P}_{2op}$ ). Com uma confiança de 95% ( $t = 1,729$ ) obteve-se como limite superior 4,61

peças/hora e limite inferior 4,31 peças/hora. Semelhante ao caso anterior, este intervalo não contém o valor zero, indicando diferença significativa, porém neste caso esta diferença representa 11,23% da produção esperada por hora ( $100 \cdot 4,46/39,69$ ), contra 1,54% no caso anterior. Deste modo, percebe-se neste caso um maior afastamento da condição de linearidade. Portanto, neste caso fica mais evidente uma relação não-linear entre o número de operadores e a produção por hora da célula.

Com relação à utilização dos operadores, a composição do seu tempo de ciclo para o cenário atual é apresentada na Tabela 17, e para o cenário alternativo na Tabela 18. No cenário atual observa-se em média um total de 95,21 segundos dedicados pelos três operadores às atividades de operação manual. No cenário alternativo, Tabela 18, o total dedicado às operações manuais é de 94,97 segundos, tal diferença entre cenários deve-se ao uso de diferentes números aleatórios. Já a movimentação apresenta uma diferença significativa, devido à maior distância percorrida no segundo cenário, passando de 18,03 para 29,06 segundos, uma diferença de 11,03 segundos. Este acréscimo no tempo de deslocamento deve-se ao *layout* da célula, cujo arranjo possui três ilhas isoladas, implicando em maiores distâncias de movimentação quando se reduziu o número de operadores. Para o tempo de espera observou-se uma redução de 65,80 para 37,69 segundos.

Tabela 17: Utilização dos operadores no cenário atual, caso 2.

Operador	Operação	Movimentação	Espera	Total
1	24,94	7,74	27,36	60,04
2*	46,04	2,10	11,82	59,96
3	24,23	8,19	26,62	59,04
Total	95,21	18,03	65,80	179,04

\* Como o segundo operador possui ciclo duplo, seu tempo de ciclo foi dividido por dois.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Tabela 18: Utilização dos operadores no cenário alternativo, caso 2.

Operador	Operação	Movimentação	Espera	Total
1*	49,16	13,95	17,87	80,98
3*	45,81	15,11	19,82	80,74
Total	94,97	29,06	37,69	161,71

\* Como os operadores produzem duas peças por ciclo, seu tempo de ciclo foi dividido por dois.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

O tempo elevado de esperas no cenário atual deve-se ao fato do tempo gasto em atividades manuais e deslocamentos ser menor que o tempo de ciclo automático dos equipamentos. Por exemplo, E2 possui ciclo automático de 50,63s (Tabela 9), mas a carga do operador 1 estimada pela simulação é de 32,68s. Já no cenário alternativo, onde cada operador

possui maior tempo de operação manual e deslocamento, a espera diminuiu. Porém, devido ao ciclo duplo do operador em E2, E3 e E4 (semelhante ao trabalho padrão com três operadores), mantém-se certo nível de espera. Ainda, devido à ausência de formação de estoques, quando ocorrem as trocas de inserto, estas obrigam o outro operador a esperar. Como consequência, no gráfico de balanceamento dos operadores, apresentado na Figura 37, não apresenta nenhum operador com carga próxima ao tempo de ciclo da célula (linha em destaque), indicando que a restrição à produção não está nos operadores.

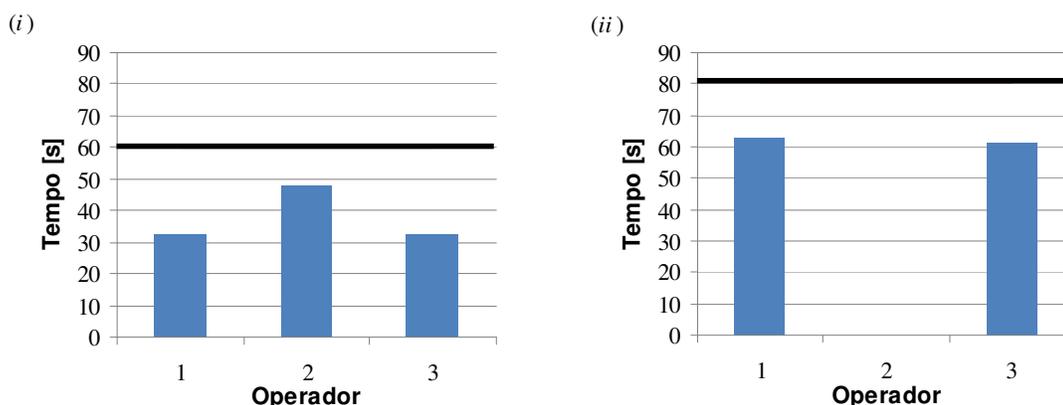


Figura 37: Gráfico de balanceamento dos operadores, caso 2.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Assim, a obtenção de uma produção por hora no cenário alternativo ( $P_{2op}$ ), maior do que o esperado ( $\hat{P}_{2op}$ ), observado na Tabela 16, é justificada pela redução de 28,11 segundos no tempo de espera dos operadores. Compensando, também, o aumento no tempo de deslocamento que atua no sentido de diminuir a produção. Desse modo, se 63,25% do tempo de mão-de-obra ( $100 \cdot (95,21 + 18,03) / 179,04$ ) era gasto com operações manuais e movimentações no cenário atual, no cenário alternativo 76,70% ( $100 \cdot (94,97 + 29,06) / 161,71$ ) era gasto em atividades semelhantes. Neste caso obteve-se um ganho de 13,45% na utilização da mão-de-obra, justificando o aumento não-linear da produção por hora da célula.

Por fim, neste caso ficou evidente uma relação não-linear entre o número de operadores e a produção por hora da célula. Evidenciou-se, como fonte desta não-linearidade a redução da espera dos operadores pelo fim do ciclo automático dos equipamentos. Esta redução na espera compensou o aumento significativo das distâncias percorridas, que tendem a diminuir a produção por hora da célula. Desta forma a melhor utilização dos operadores implicou num aumento da produtividade da mão-de-obra, gerando a não-linearidade.

### 4.3.3 Caso 3: Empresa C

O terceiro caso apresentado neste trabalho foi realizado em uma empresa na região industrial de Caxias do Sul. A empresa conta com aproximadamente 950 funcionários, onde foram realizadas sete visitas de 4 a 5 horas.

#### 4.2.3.1 Descrição da célula: Empresa C

Esta peça é fabricada a partir de uma peça forjada, que passa por sucessivas operações, geralmente de usinagem. A peça pesa aproximadamente 5kg e é fabricada em 3 turnos.

Esta célula fabrica 3 famílias distintas, sendo a família em estudo responsável por aproximadamente 80% do volume de produção da célula. Neste caso, também foi constatada na entrevista a existência de variações na demanda para os itens da célula. Na ocorrência destas variações, itens são transferidos entre as células da empresa ou o número de operadores na célula é alterado.

Na sua fabricação, cada peça passa por uma seqüência de operações de usinagem e termina com a montagem de alguns componentes. Os equipamentos E1 a E5 possuem ciclo automático, enquanto E6 e E7 exigem a presença do operador, ver Figura 38. Devido ao peso das peças, estas geralmente exigem uma dupla movimentação na carga dos equipamentos. Primeiro, o operador deve descarregar o equipamento e colocar a peça retirada em um suporte. Em seguida, deve pegar a peça a ser processada e colocá-la no equipamento, acionando o ciclo automático. Então, o operador pega a peça colocada no suporte e inicia seu deslocamento ao próximo equipamento.

O processo de fabricação das peças inicia com o operador 1 posicionado em P1, onde retira de E1 a peça trabalhada no ciclo anterior. Esta peça é colocada no suporte S1 e, a seguir, o operador pega uma peça da caixa de peças forjadas. Após colocar a peça em E1, o operador aciona o ciclo automático e pega a peça de S1, iniciando o deslocamento para P2.

O equipamento E2 é composto por discos de usinagem e uma mesa deslizante, conforme Figura 39. Isto permite que o equipamento seja descarregado e carregado por um dos lados, esquerdo (E2a) ou direito (E2b), enquanto outra peça é usinada no lado oposto. O operador 1 ao chegar em uma das extremidades, por exemplo E2a, larga a peça trazida de E1 sobre o equipamento, retira a peça pronta, e coloca-a no suporte S3. Volta a E2 e coloca a peça vinda de E1 em E2a. Enquanto o operador realiza estas atividades, outra peça é usinada

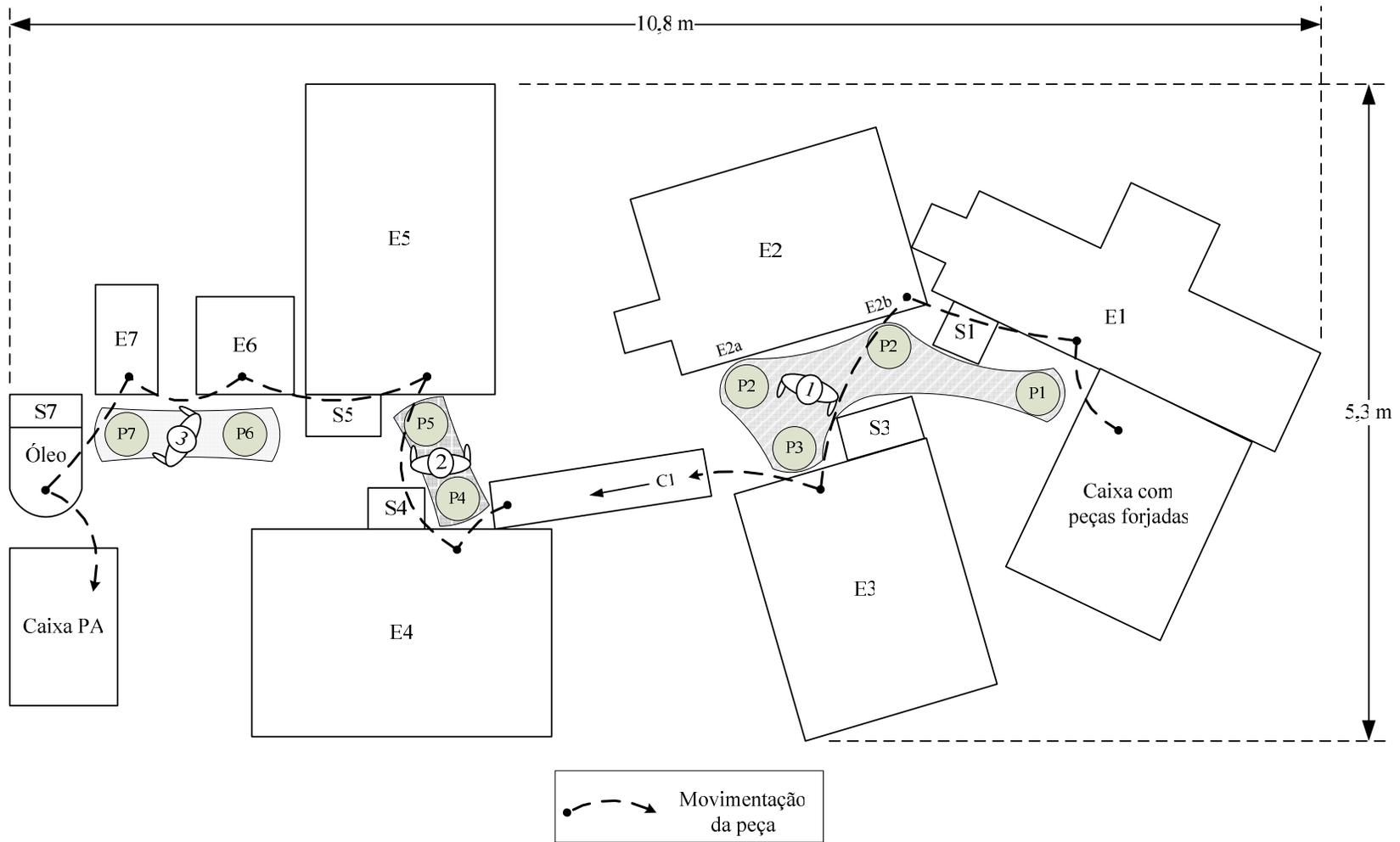


Figura 38: Representação esquemática da célula para o cenário atual (três operadores), caso 3.  
 Fonte: elaborado pelo autor, 2009.



suporte S3, coloca em E3 e aciona o ciclo automático. Finalmente, o operador 1 retorna a P1, iniciando um novo ciclo.

O operador 2 inicia seu ciclo retirando a peça pronta do ciclo automático de E4 e colocando-a no suporte S4, ao lado de E4. Pega, então, uma peça vinda do operador 1 através da calha C1, coloca em E4 e aciona o ciclo automático. Em seguida, realiza manualmente a rebarbação da peça sobre S4. Após terminar esta atividade, vira-se para E5, retira a peça pronta do ciclo anterior e coloca-a no suporte S5. Em seguida, pega a peça já rebarbada localizada em S4, coloca em E5 e aciona o ciclo automático. A peça retirada de E5 também passa por uma atividade de rebarbação realizada manualmente. Após esta atividade a peça espera no suporte S5 até que o operador 3 pegue-a. Enquanto isso o operador 2 retorna a E4 dando início a um novo ciclo.

O operador 3 inicia o ciclo preparando os componentes a serem fixados na peça em E6, a seguir retira a peça já rebarbada do suporte S5 e coloca em E6 e aciona. Por se tratar de uma prensa, esta exige que o operador mantenha acionado dois botões simultaneamente, um com a mão esquerda e outro com a mão direita, exigindo a presença do operador durante o ciclo. Após as atividades de E6 o operador desloca a peça para E7, fixa os componentes necessários e aciona E7, aguardando o fim do ciclo. Após este ciclo o operador coloca a peça no suporte S7 para aguardar o banho de óleo. A cada 6 peças o operador coloca as peças já escorridas na caixa de peças prontas, pega com o gancho as próximas 6 peças em S7, mergulha-as no óleo e deixa escorrendo até que outras 6 peças estejam prontas para o banho. Após esta atividade o operador retorna para P6, iniciando um novo ciclo.

Com relação às trocas de inserto, nesta célula são necessárias trocas freqüentes de inserto apenas nos equipamentos 1 e 5. Os demais equipamentos apresentam troca de inserto no início do turno, E3 e E4, e a cada vinte dias em média, E2.

Nesta célula ocorrem interrupções, principalmente para o uso das prensas por outras células. Ainda, há a formação de estoque entre as operações da célula, principalmente em C1. Este estoque em C1 é absorvido no horário de almoço, quando apenas um operador permanece na célula realizando as atividades do operador 2. Este procedimento visa manter E5 funcionando todo o tempo, pois este equipamento é o gargalo da célula.

#### 4.2.3.2 Modelo conceitual: Empresa C

Semelhante aos casos anteriores, foi modelada a família de maior volume como representação da célula. Este modelo não inclui, assim, a ocorrência de *setups*. As

perturbações ao funcionamento da célula, como o uso das prensas por outras células, não foram representados no modelo. Novamente, as atividades de operação manual e de deslocamento dos operadores foram modeladas por distribuições de probabilidade. Já os tempos de ciclo automático dos equipamentos foram modelados com valores determinísticos. A coleta de dados e as distribuições de probabilidade são apresentadas no próximo item.

A partir da observação do funcionamento da célula, foram modeladas as atividades dos operadores. A Figura 40, apresenta as atividades do operador 1. Para este operador o tempo de deslocamento entre P2 e P3 foi incluído no tempo de atividade Op1At3, por ser significativamente reduzido. Ainda, foi considerado que o tempo de descarga, carga e acionamento de E2a e E2b são equivalentes e, portanto, foram modelados com um única distribuição, associada a Op1At2. O mesmo ocorre para o deslocamento entre P1 e P2, esta representa tanto deslocamentos para E2a quanto para E2b. Ainda com relação à modelagem de E2, esta preservou a possibilidade o operador iniciar a troca em um dos lados, E2a ou E2b, enquanto o outro lado está em processamento, respeitando-se o tempo de fechamento da proteção. E, caso o operador termine a descarga e carga antes do fim do ciclo automático, este terá que esperar seu término para acioná-lo novamente.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op1At1	Descarregar, carregar e acionar E1	10,8"	33,3"
2	Op1Mov1	Mover-se de P1 até P2	1,29"	-
3	Op1At2	Descarregar, carregar e acionar E2	8,76"	60,5"
4	Op1At3	Descarregar, carregar e acionar E3	4,62"	49,5"
5	Op1Mov2	Mover-se de P3 até P1	1,46"	-
<b>Total</b>			<b>26,9"</b>	<b>143"</b>

Figura 40: Atividades do operador 1, caso 3.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para o operador 2 foram modeladas as atividades apresentadas na Figura 41. Neste caso não foram modeladas os deslocamentos do operador pois os postos de trabalho encontram-se muito próximos, sendo este tempo incluído no tempo de atividade do operador.

Por fim, para o operador 3 foi modelado um ciclo base, apresentado na Figura 42. Este é complementado pela atividade Op3At3, apresentada na Figura 43, realizada a cada seis ciclos base.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op2At1	Descarregar, carregar e acionar E4	5,15"	43,7"
2	Op2At2	Rebarbar manualmente a peça retirada de E4.	3,23"	-
3	Op2At3	Descarregar, carregar e acionar E5	5,09"	57,0"
4	Op2At4	Rebarbar manualmente a peça retirada de E5.	7,10"	-
<b>Total</b>			<b>20,6"</b>	<b>101"</b>

Figura 41: Atividades do operador 2, caso 3.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op3At1	Colocar buchas	12,2"	-
2	Op3Mov1	Mover-se de P6 até P7	0,67"	-
3	Op3At2	Prensar componentes.	11,8"	-
4	Op3Mov2	Mover-se de P7 até P6	0,92"	-
<b>Total</b>			<b>25,5"</b>	<b>0,0"</b>

Figura 42: Atividades do operador 3, caso 3.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
5	Op3At3	Colocar peças na caixa de produtos acabados e novas peças no óleo	25,9"	-
<b>Total</b>			<b>25,9"</b>	<b>0,0"</b>

Figura 43: Atividade de formação do lote do operador 3, caso 3.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Assim como no caso anterior, a troca de inserto foi modelada como uma atividade do operador. Ainda, somente a troca de insertos para E1 e E5 foi modelada, cujo intervalo entre trocas é definido pelo número de peças produzidas. Também semelhante ao caso anterior, o desempenho da célula foi avaliado através da sua produção média por hora. Neste cálculo foram consideradas apenas as peças entregues na caixa de produtos acabados, em lotes de 6 peças. Para este modelo também não serão utilizadas medidas do regime permanente, sendo simulado um período correspondente a um turno de trabalho. O período que corresponde a um

turno de trabalho no modelo é de 4 horas e 24 minutos. Assim, descontando-se o tempo necessário para gerar o estoque inicial de sete peças, chegou-se ao tempo simulado, 4 horas e 17 minutos, em cada replicação.

#### 4.2.3.3 Coleta de dados: Empresa C

Novamente, a coleta de dados assumiu não haver diferença significativa entre os dias da semana para os dados coletados. Neste caso, os valores referentes às trocas de inserto não puderam ser coletados por observação direta, sendo, então, estimados pelos operadores da célula. Os demais dados foram coletados pelo próprio pesquisador através da observação direta.

Para a coleta de dados foi feita uma estimativa inicial seguindo o cálculo para tamanho de amostras apresentado no capítulo 3. Observou-se que o tempo real das atividades a serem coletadas era ordem de 15 segundos para este caso. Assim, aceitou-se um erro de 1,0 segundo e estimou-se um desvio da ordem de 3,2 segundos para as atividades. Assim, para uma confiança de 95% ( $z = 1,96$ ), obteve-se um valor de  $n$  igual a 39,3. Adotou-se, assim, um tamanho de amostra de 40. Devido à menor frequência da atividade Op3At3, Figura 43, somente foi possível coletar uma amostra de tamanho 10 para esta atividade, correspondendo a uma confiança de 68%. Para o tempo de processamento dos equipamentos foi coletada uma amostra de tamanho 5.

As médias obtidas para representar o tempo de processamento no modelo são apresentadas na Tabela 19. Sendo E2 (Ciclo) referente ao tempo necessário para a mesa deslizante chegar ao final do curso, e E2 (Proteção) referente ao tempo de fechamento da proteção após o acionamento do ciclo da mesa. Os dados coletados utilizados para o ajuste das distribuições e definição do tempo dos equipamentos são apresentados no Apêndice C deste trabalho.

Tabela 19: Tempo de ciclo automático por equipamento, caso 3.

	<b>E1</b>	<b>E2 (Ciclo)</b>	<b>E2 (Proteção)</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>
Média	33,30	50,85	9,60	49,51	43,74	56,95

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

As distribuições ajustadas aos dados coletados são apresentadas na Tabela 20. Nesta tabela também são apresentados os valores de  $p$  para os testes K-S e A-D, realizados para avaliar a qualidade do ajuste das distribuições aos dados. Novamente, para uma confiança de

95%, são esperados valores de p maiores do que 0,05. Neste caso, Op1At2 apresentou um valor próximo do limite para o teste A-D (0,053), com um valor não tão alto para o K-S (0,394). Esta baixa qualidade do ajuste pode estar associada a uma possível diferença entre as atividades em E2a e E2b, que não foram consideradas.

Tabela 20: Distribuições de probabilidade ajustadas às atividades dos operadores, caso 3.

Atividade	Distribuição teórica	Expressão	Média	K-S	A-D
Op1At1	Gama	$8,39+G(1,75; 1,38)$	10,8	0,855	0,822
Op1Mov1	Gama	$-73,9+G(5,85E+4; 0,00129)$	1,29	0,965	0,918
Op1At2	Log-Logistic	$5,02+2,79*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/2,44)$	8,76	0,394	0,053
Op1At3	Weibul	$2,49+W(1,68; 2,39)$	4,62	0,957	0,946
Op1Mov2	Pearson 5	$0,237+P5(20,8; 24,2)$	1,46	1,000	1,000
Op2At1	Log-Logistic	$-3,24+8,31*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/13,6)$	5,15	0,881	0,792
Op2At2	Log-Logistic	$-0,189+3,28*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/6,36)$	3,23	0,720	0,964
Op2At3	Log-Logistic	$2,40+2,44*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/4,14)$	5,09	0,724	0,788
Op2At4	Gama	$-2,93+G(25,5; 0,393)$	7,10	0,659	0,690
Op3At1	Weibul	$-2,08+W(5,56; 15,4)$	12,2	0,763	0,733
Op3Mov1	Inversa Gaussiana	$-0,909+IG(244; 1,58)$	0,67	0,986	0,994
Op3At2	Pearson 5	$7,50+P5(2,63; 6,94)$	11,8	0,941	0,943
Op3Mov2	Inversa Gaussiana	$0,593+IG(0,909; 0,325)$	0,92	0,723	0,736
Op3At3*	Log-Logistic	$20,0+5,62*(1,0/((1,0/U(0,5;0,5))-1,0))^{**}(1,0/5,79)$	25,9	0,969	0,982

\*Ajuste realizado com 10 pontos amostrais, demais atividades 40 pontos amostrais.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para definir as trocas de inserto foram utilizadas estimativas feitas pelos operadores. Na Tabela 21 encontram-se as estimativas realizadas quanto ao número de peças processadas entre duas trocas e o tempo necessário para realizar a mesma. Para o equipamento E1, estimou-se uma produção de 30 peças e um tempo médio de troca de 1 minuto. Assim, definindo-se uma variabilidade de 5 peças a mais ou a menos foram definidos os limites inferior e superior apresentados na Tabela 21. Para o tempo de troca utilizou-se uma distribuição triangular de média 1, conforme Tabela 21. De modo semelhante, para E5 obteve-se uma estimativa de 600 peças entre trocas, e um tempo médio de 2,5 minutos para sua realização. Dessa forma, definindo uma variabilidade de 15 peças entre trocas e utilizando a distribuição triangular para o tempo de troca chegou-se aos valores da Tabela 21. Ainda, verificou-se o estoque máximo de C1 em 40 peças e em S5 de 10 peças.

Também foram coletados dados para a validação do modelo. Com esta finalidade foram coletados amostras do tempo de ciclo da célula, apresentadas na validação do modelo.

Tabela 21: Característica das trocas de inserto por equipamento, caso 3.

Equipamento	Limite inferior	Limite superior	Tempo de troca
E1	25	35	T(0,7; 1,0; 1,3)
E5	585	615	T(2,0; 2,5; 3,0)

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#### 4.2.3.4 Modelo computacional: Empresa C

O modelo computacional desenvolvido visa representar o modelo conceitual descrito no item 4.2.3.2. Assim como nos casos anteriores, seu desenvolvimento passou por modelos intermediários até a obtenção do modelo final. Este processo de obtenção do modelo computacional é descrito em maiores detalhes no Apêndice C, juntamente com o código gerado. Assim como no caso 2, não foi necessário definir o período de *warm-up*, pois não está sendo avaliado o regime permanente do sistema,.

#### 4.2.3.5 Validação do modelo: Empresa C

Com relação à coleta de dados para a validação, foram coletadas 5 amostras do tempo de ciclo da célula, cada uma correspondendo à média de 12 peças. Assim, esta média corresponde ao tempo de ciclo médio observado durante a colocação de dois conjuntos de seis peças na caixa, depois do banho de óleo.

Para a validação deste modelo foram simuladas cinco replicações independentes. As estimativas para o tempo de ciclo destas cinco replicações foram confrontadas com as cinco amostras coletadas. Os valores das amostras do sistema real,  $TC_r$ , e das estimativas do modelo,  $TC_m$ , são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22: Validação do modelo atual, caso 3.

Replicação	$TC_r$	$TC_m$	$TC_m - TC_r$
1	59,73	62,32	2,59
2	63,17	62,23	-0,94
3	65,04	63,08	-1,96
4	40,88	62,78	21,90
5	52,79	62,82	10,03
Média	56,32	62,65	6,32
Desvio Padrão	9,82	0,36	9,90
Erro (4gl, 95%)	9,36	0,34	9,43

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

A partir destes dados foi construído o intervalo de confiança  $t$  de 95% com 4 graus de liberdade ( $t = 2,132$ ) para a diferença entre as estimativas e os dados do sistema. Como resultado, obteve-se um limite superior de 15,76 e um limite inferior de -3,11, indicando que o modelo desenvolvido é representativo do sistema real sob este aspecto, uma vez que este

intervalo contém o valor zero. Assim, considera-se o modelo válido para a estimativa da produção por hora uma vez que esta tem relação direta com o tempo de ciclo.

#### 4.2.3.6 Cenário alternativo: Empresa C

A célula em estudo opera com três operadores e não possui trabalho padrão para outro número de operadores. Entretanto, foi relatado que a empresa já tentou trabalhar com dois operadores nesta célula, tendo rejeitado esta possibilidade por apresentar uma redução de aproximadamente 20% na produção por turno. Pela linearidade da mão-de-obra a redução esperada era de aproximadamente 33%, (um operador a menos em três). Dessa forma, percebe-se neste caso que a produção obtida foi maior que o esperado, indicando uma maior produtividade por operador ao trabalhar com apenas dois operadores.

Em função da ausência de trabalho padrão para dois operadores, o cenário alternativo simulado surgiu da observação direta da célula. Durante a coleta de dados observou-se, no horário em que apenas um operador trabalhava na célula, que este realizava as atividades dos operadores 2 e 3 durante o mesmo tempo de ciclo. Dessa forma, na Figura 44 é apresentado o novo trabalho padrão para o operador 2. Para o cenário alternativo, o segundo operador incorporou as atividades do terceiro operador, permanecendo as atividades do operador 1 as mesmas (apresentadas na Figura 40). A nova seqüência de atividades do operador 2 foi alterada apenas no deslocamento de retorno, Op3Mov2, que antes era de P7 para P6 e passou a ser de P7 para P4. A obtenção deste tempo de deslocamento foi obtida pela extrapolação linear do tempo anterior (0,92s) em função da distância percorrida, 3,19m dividido por 0,88m. Na Figura 45 é apresentada a nova seqüência de atividades para o segundo operador. Ainda, a cada 6 ciclos o operador deve realizar a colocação das peças no óleo, conforme Figura 43.

A duração da simulação deste cenário alternativo foi definida em 4 horas e 13,5 minutos, depois de descontados os 10,5 minutos referentes ao estoque inicial (7 peças) e considerando-se o ciclo esperado de 90 segundos. Após a definição do cenário alternativo este modelo foi programado e verificado.

Para a validação deste cenário foi verificada a seqüência de atividades dos operadores e a seqüência de processamento dos itens na célula. Além disso, com as informações apresentadas na entrevista, foi possível confrontá-las com os resultados do cenário alternativo, apresentados na Tabela 23 coluna  $P_{2op}$ . Para uma produção de aproximadamente 57 peças/hora, com três operadores, uma redução de 20% com a mudança

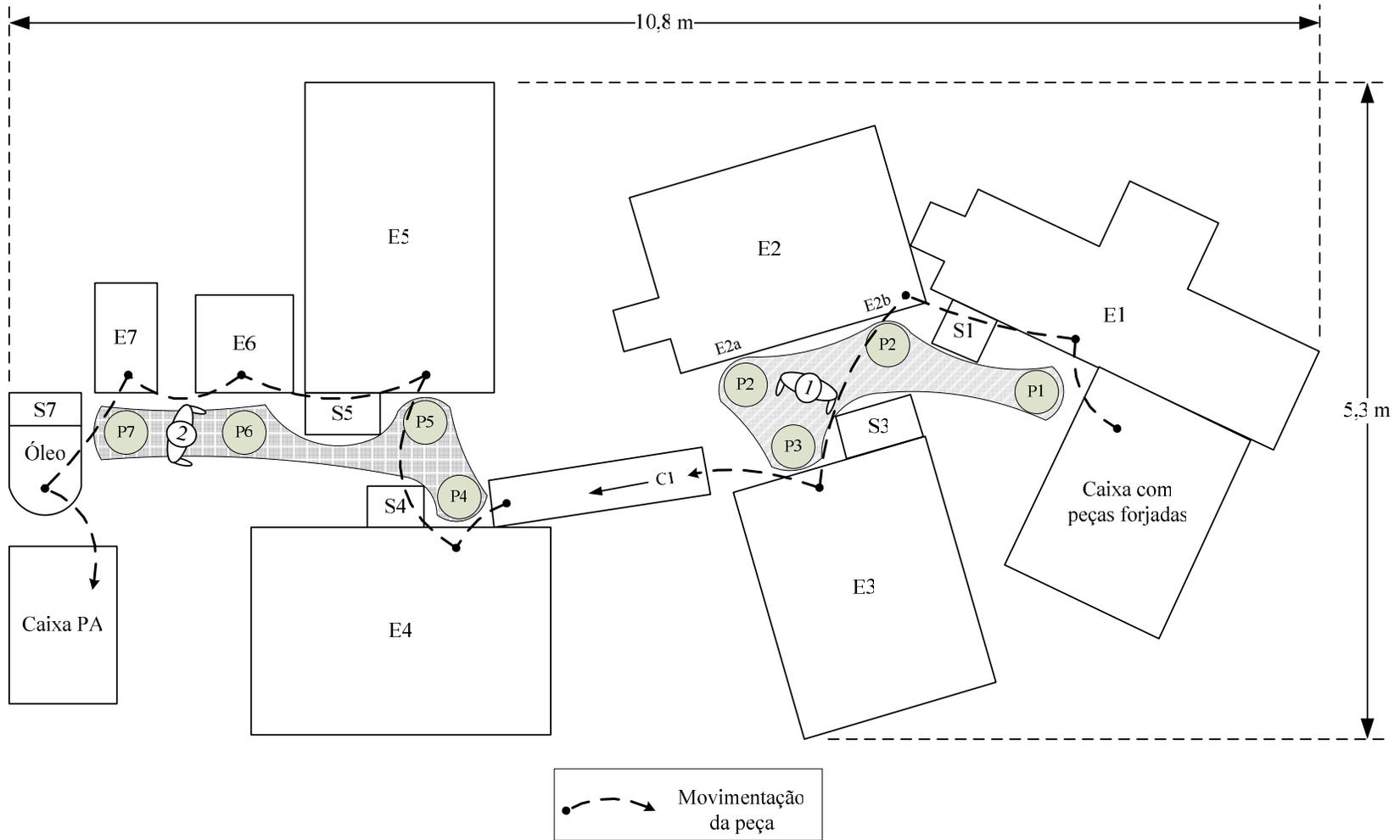


Figura 44: Representação esquemática da célula para o cenário alternativo (dois operadores), caso 3.  
 Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

#	Atividade	Descrição	Operador	Ciclo Automático
1	Op2At1	Descarregar, carregar e acionar E4	5,15"	43,7"
2	Op2At2	Rebarbar manualmente a peça retirada de E4.	3,23"	-
3	Op2At3	Descarregar, carregar e acionar E5	5,09"	57,0"
4	Op2At4	Rebarbar manualmente a peça retirada de E5.	7,10"	-
5	Op3At1	Colocar buchas	12,2"	-
6	Op3Mov1	Mover-se de P6 até P7	0,67"	-
7	Op3At2	Prensar componentes.	11,8"	-
8	Op3Mov2'	Mover-se de P7 até (P6) P4	3,34"	-
<b>Total</b>			<b>48,5"</b>	<b>101"</b>

Figura 45: Atividades do operador 2 no cenário alternativo, caso 3  
 Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

para 2 operadores significam uma produção aproximada de 46 peças/hora. Sabe-se que o valor esperado para a produção é de 38 peças/hora ( $57 \cdot 2/3$ ), caso fosse preservada a linearidade. Assim como no caso anterior, a simulação apresentou uma produção por hora maior do que a estimada na entrevista.

Apesar de ter sido observado durante a coleta de dados a exequibilidade do conjunto de tarefas atribuídas aos operadores no cenário alternativo, isto só foi verificado por um curto período de tempo, aproximadamente uma hora. Desta forma, o desgaste físico proporcionado ao longo do turno de trabalho pode justificar a diferença observada entre as estimativas. Sendo assim, a experiência prática relatada na entrevista contém o efeito de tal desgaste físico, porém este aspecto não foi modelado na simulação devido à impossibilidade de observar e, conseqüentemente, de mesurar tal desgaste. Semelhante ao caso anterior, a aceitação deste modelo para a análise da linearidade da mão-de-obra fica sujeita a algumas considerações. Este cenário é considerado representativo da situação em que os operadores estariam preparados para realizar as atividades no mesmo ritmo do cenário atual, sem sofrer os efeitos do desgaste físico. Novamente, destaca-se o fato deste cenário ser utilizado com o objetivo de evidenciar os efeitos na alteração do número de operadores, sendo utilizado como comparativo contra o cenário atual. Devido a esta condição de desempenho relativo, considerou-se que mesmo este cenário não apresentando precisão na estimativa da produção

por hora, a análise deste modelo poderia auxiliar na identificação de efeitos também presentes no sistema real.

#### 4.2.3.7 Análise da linearidade da mão-de-obra: Empresa C

Com a definição dos cenários atual e alternativo foram geradas 20 replicações para cada cenário. Na Tabela 23 são apresentados os resultados obtidos para a produção por hora no cenário atual ( $P_{3op}$ ) e no cenário alternativo ( $P_{2op}$ ). Ainda, são apresentados nesta tabela os valores esperados para a produção por hora caso a hipótese de linearidade seja verdadeira ( $\hat{P}_{2op}$ ), assim como a diferença entre os valores de  $P_{2op}$  e  $\hat{P}_{2op}$ .

Tabela 23: Produção por hora obtido para 3 e 2 operadores, caso 3.

Replicação	$P_{3op}$	$\hat{P}_{2op}$	$P_{2op}$	$P_{2op} - \hat{P}_{2op}$
1	57,48	38,32	55,32	17,00
2	56,07	37,38	55,32	17,94
3	56,07	37,38	55,32	17,94
4	57,48	38,32	53,90	15,58
5	56,07	37,38	55,32	17,94
6	57,48	38,32	55,32	17,00
7	57,48	38,32	53,90	15,58
8	56,07	37,38	55,32	17,94
9	57,48	38,32	55,32	17,00
10	57,48	38,32	53,90	15,58
11	56,07	37,38	55,32	17,94
12	57,48	38,32	55,32	17,00
13	57,48	38,32	53,90	15,58
14	56,07	37,38	55,32	17,94
15	56,07	37,38	55,32	17,94
16	57,48	38,32	55,32	17,00
17	57,48	38,32	53,90	15,58
18	57,48	38,32	55,32	17,00
19	57,48	38,32	55,32	17,00
20	57,48	38,32	55,32	17,00
Média	56,99	37,99	54,96	16,97
Desvio Padrão	0,47	0,21	0,40	0,85
Erro (19gl, 95%)	0,27	0,18	0,24	0,36

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Para avaliar a necessidade de um maior número de replicações, calculou-se o erro para 95% de confiança ( $t = 1,729$ ), apresentado na Tabela 23. Neste caso, obteve-se um erro percentual de 0,47% ( $100 \cdot 0,27/56,99$ ) para  $P_{3op}$  e de 0,44% ( $100 \cdot 0,24/54,96$ ) para  $P_{2op}$ . Novamente, julgou-se desnecessária a coleta de mais replicações.

Assim como nos casos anteriores foi calculado o intervalo de confiança para os valores de  $(P_{2op} - \hat{P}_{2op})$ . Obteve-se como limite superior 17,33 e como limite inferior 16,62 peças/hora, para o intervalo com uma confiança de 95% ( $t = 1,729$ ). Novamente, obteve-se uma diferença significativa entre  $P_{2op}$  e  $\hat{P}_{2op}$ . Neste caso esta diferença representa 44,66% ( $100 \cdot 16,97/37,99$ ) da produção esperada por hora, apresentando o maior afastamento da condição de linearidade entre os três casos estudados. Tal resultado, que indica uma produção por hora aproximadamente constante apesar da redução de um operador, apresenta-se consistente com a observação direta realizada durante a coleta de dados, de que o operador 2 poderia realizar as atividades do operador 3.

Seguindo para a análise da utilização dos operadores, obteve-se no cenário atual um total de 75,13 segundos dedicados pelos três operadores às atividades de operação manual, ver Tabela 24. No cenário alternativo este valor passou para 75,38 segundos, Tabela 25, diferença atribuída ao uso de diferentes números aleatórios entre os cenários. Para as movimentações obteve-se uma diferença no tempo dedicado a estas atividades, passando de 4,31 segundos para 6,73 segundos, devido à maior distância percorrida pelo segundo operador que agora também realiza as atividades do operador 3. Finalmente, para o tempo de espera obteve-se uma redução do tempo total dos operadores de 100,53 segundos, Tabela 24, para 38,07 segundos, Tabela 25. Tal redução decorreu do melhor uso do segundo operador, que no cenário alternativo possui mais atividades de operação manual. Com este aumento do tempo de operação manual, este operador tende a retornar a E5, máquina com maior tempo de ciclo automático (56,95s), somente próximo ao término do processamento da peça, reduzindo a espera por parte do operador. No gráfico de balanceamento dos operadores, ver Figura 46, pode ser percebida a baixa utilização no cenário atual, em comparação ao cenário alternativo.

Tabela 24: Utilização dos operadores no cenário atual, caso 3.

<b>Operador</b>	<b>Operação</b>	<b>Movimentação</b>	<b>Espera</b>	<b>Total</b>
1	26,13	2,73	26,49	55,35
2	20,75	0,00	41,51	62,26
3	28,25	1,58	32,53	62,36
Total	75,13	4,31	100,53	179,97

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Tabela 25: Utilização dos operadores no cenário alternativo, caso 3.

<b>Operador</b>	<b>Operação</b>	<b>Movimentação</b>	<b>Espera</b>	<b>Total</b>
1	26,25	2,75	26,51	55,51
2	49,13	3,98	11,56	64,67
Total	75,38	6,73	38,07	120,18

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

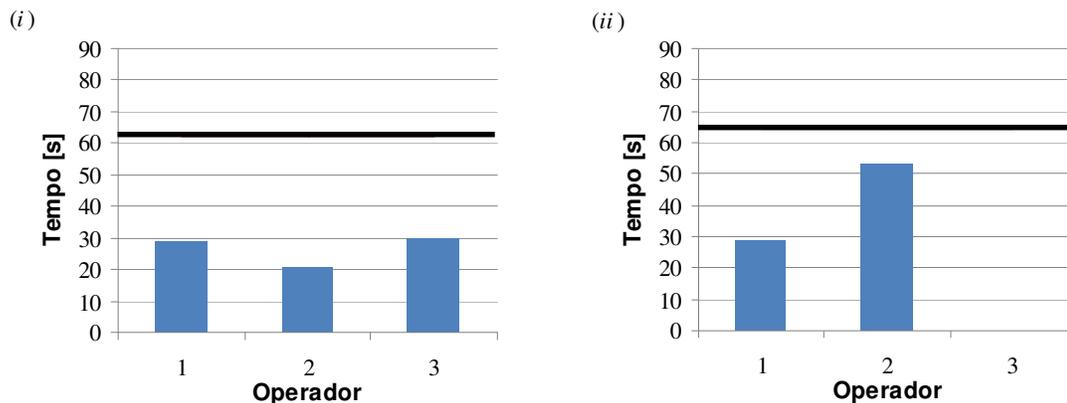


Figura 46: Gráfico de balanceamento para os operadores, caso 3.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Novamente, a redução do tempo de espera dos operadores justifica a obtenção de uma produção por hora,  $P_{2op}$ , maior do que o esperado,  $\hat{P}_{2op}$ , observado na Tabela 23. Neste caso, no cenário atual são gastos 44,14% do tempo de mão-de-obra ( $100 \cdot (75,13 + 4,31) / 179,97$ ) com atividades de operação manual e deslocamentos. Já no cenário alternativo são gastos 68,32% do tempo de mão-de-obra em atividades semelhantes ( $100 \cdot (75,38 + 6,73) / 120,18$ ). Observa-se um ganho de 24,18% na utilização da mão-de-obra, que justifica a redução não-linear da produção por hora.

De modo geral, neste caso não se verificou a linearidade entre a produção por hora e o número de operadores. Observou-se, assim como nos casos anteriores, a influência da utilização dos operadores na obtenção desta linearidade. De modo mais acentuado do que o caso anterior, quando se reduziu o número de operadores estes passaram a utilizar maior parte do seu tempo em atividades de operação manual e deslocamento, não incorrendo em esperas pelo fim do ciclo automático dos equipamentos.

#### 4.3 Discussão dos Resultados

Inicialmente são resumidas algumas características dos três casos, seguidas da análise dos resultados. As três células observadas estão inseridas em empresas com mais de 900 funcionários. Isto pode ser conseqüência da relação entre o porte da empresa e o uso de células, já observada por Swamidass<sup>5</sup> *apud* Johnson (2004). Ainda, em todos os casos, as

<sup>5</sup> SWAMIDASS, P. **Technology on the factory floor III: technology use and training in U.S. manufacturing firms**. Washington: The Manufacturing Institute/National Association of Manufacturers, 1998.

células observadas atenderam a característica de arranjo dos equipamentos segundo as necessidades de processamento dos produtos e de alocação dos operadores às atividades, conforme Tabela 26. Com relação às demais características, o fluxo contínuo estava presente em toda a célula apenas no primeiro caso, já que nos casos 2 e 3 havia estoque interno à célula em pontos específicos. A independência da estrutura estava presente nos casos 1 e 2, sendo considerada apenas parcial no terceiro em função do compartilhamento das prensas com outras células.

Tabela 26: Características das células observadas.

<b>Característica</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
Arranjo dos equipamentos	x	x	x
Alocação dos operadores às atividades	x	x	x
Fluxo contínuo	x	parcial	parcial
Estrutura independente	x	x	parcial

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Quanto à verificação da presença de variações na demanda dos itens das células, esta foi confirmada pelas empresas, ver Tabela 27. Para lidar com esta questão, a inclusão ou exclusão de uma ou mais famílias da célula apareceu como a alternativa escolhida pelas empresas nos três casos, estando coerente com o trabalho de Askim, Selim e Vakharia (1997), que propõe que se considere no processo de formação das células a produção do mesmo item em mais de uma célula.

Tabela 27: Característica da demanda das células observadas.

<b>Característica</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
Variações na demanda	x	x	x
Inclusão/exclusão de famílias no combate às variações da demanda	x	x	x
Variação no número de operadores no combate às variações da demanda	intenção		x*

\*Apesar da indicação de uso da variação no número de operadores, esta célula não possui trabalho padrão definido para estas situações.

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Já o uso da variação no número de operadores não foi observado como prática regular nestas células. No primeiro caso, apesar de não ser observado na célula em estudo, foi apresentado como meta da empresa. No segundo caso, mesmo a célula possuindo trabalho padrão para três e dois operadores, esta não varia o número de operadores para enfrentar de modo permanente as variações na demanda. Para o terceiro caso foi informado o uso da

variação no número de operadores, porém não havia opções de trabalho padrão definido para diferentes números de operadores.

Antes de discutir a linearidade da mão-de-obra, alguns aspectos do estudo dos casos devem ser destacados. Com relação aos modelos simulados, obteve-se uma representação do cenário atual (três operadores) considerada válida para os fins deste estudo nos três casos. Porém, nos casos 2 e 3, a representatividade do cenário alternativo (dois operadores) ficou restrita sob alguns aspectos. As divergências entre as estimativas obtidas através da simulação e as estimativas dos supervisores das células apontaram para a necessidade de modelagem do desgaste físico dos operadores. Entretanto, isto não foi possível devido à impossibilidade de observação e, conseqüentemente, de mensuração deste desgaste. Deste modo, utilizou-se o cenário alternativo para a análise da linearidade da mão-de-obra considerando que este é representativo de uma situação em que os operadores estariam preparados para esta nova condição de trabalho. Ainda, o objetivo deste cenário alternativo é observar os efeitos da alteração no número de operadores, através do confronto entre os resultados dos cenários. Portanto, mesmo que o cenário alternativo não possua precisão na estimativa da produção por hora, a análise do modelo simulado pode auxiliar na identificação de efeitos da alteração no número de operadores presentes também no sistema real, atendendo aos objetivos do estudo. Este tipo de resultado não quantitativo da simulação está de acordo com Pidd (2004). Conforme o autor, a simulação também tem como resultado o aprendizado sobre o sistema modelado, que ocorre ao longo do processo de modelagem e simulação. O processo de estruturação do problema e execução do modelo programado melhora a compreensão sobre as características do sistema em estudo, permitindo atuar de forma mais adequada sobre o sistema real.

A seguir é analisada a questão da linearidade da mão-de-obra a partir dos resultados obtidos com a simulação. Na Tabela 28 são apresentadas as produções por hora das células no cenário atual ( $P_{3op}$ ), a produção esperada pela hipótese de linearidade da mão-de-obra ( $\hat{P}_{2op}$ ) e a produção no cenário alternativo ( $P_{2op}$ ). Observa-se através da diferença entre  $P_{2op}$  e  $\hat{P}_{2op}$ , que apenas o primeiro caso apresentou um resultado próximo do linear, com uma diferença correspondente a 1,6% do valor esperado. Já a diferença para os casos 2 e 3 é de 11,2% e 44,7%, respectivamente. Ainda, para a simulação, os três casos apresentaram produção maior do que a esperada no cenário alternativo, resultando em diferenças numericamente positivas.

Apesar da não-linearidade observada na alteração do número de operadores, significativa nos casos 2 e 3, resultar em um ganho de produtividade por operador, não se

Tabela 28: Produção por hora para os três casos.

	$P_{3op}$	$\hat{P}_{2op}$	$P_{2op}$	$P_{2op} - \hat{P}_{2op}$
Caso 1	67,65	45,10	45,80	0,70
Caso 2	59,53	39,69	44,15	4,46
Caso 3	56,99	37,99	54,96	16,97

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

deve considerar este fato benéfico. Este aparente ganho é relativo ao sentido da mudança (de três para dois operadores), sempre sendo observada uma queda de produtividade no sentido oposto (de dois para três operadores). A presença da não-linearidade mostra que um dos trabalhos padrão deve ser aprimorado (três operadores) para o mesmo nível de produtividade por operador do outro cenário (dois operadores).

Para analisar as diferenças entre os resultados obtidos via simulação e os esperados pela hipótese de linearidade da mão-de-obra, é necessário ter em mente outras variáveis que afetam a produção, além do número de operadores. Na expressão 7, são apresentadas três variáveis, além do número de operadores, que podem influenciar no total de peças produzidas pela célula. Equações semelhantes podem ser encontradas em Krajewski e Ritzman (1999) e Moreira (2006).

$$Produção = T * N * U / Q \quad (7)$$

Nesta expressão, o tempo disponível ( $T$ ), corresponde ao intervalo de tempo disponível para a produção, medido em unidades de tempo. O número de operadores ( $N$ ), corresponde a quantidades de operadores alocados a produção das peças, cuja unidade é operador. A utilização dos operadores ( $U$ ), corresponde ao percentual do tempo disponível em que os operadores realizam as tarefas necessárias à fabricação das peças, este elemento é adimensional. A quantidade de trabalho por peça ( $Q$ ), corresponde ao tempo necessário de atividade dos operadores para se produzir uma peça, definido pelo somatório das atividades manuais e deslocamentos de todos os operadores, este é medido em unidade de tempo\*operador/peça.

Cabe destacar que a medida de utilização dos operadores inclui, além do tempo de operação, o tempo de deslocamento dos mesmos. Desta forma, esta medida reflete a fração do tempo em que o operador realiza as atividades definidas na folha de rotina de operações padronizadas. Ou seja, esta corresponde ao percentual de tempo em que o operador realiza

suas atribuições (processamentos e deslocamentos), sendo que no restante do tempo o operador fica ocioso (em espera).

Outra forma de medir a utilização da mão-de-obra, associada à abordagem do Sistema Toyota de Produção, seria através da observação da fração de tempo em que o operador de fato agrega valor, ou seja, somente o tempo de atividade manual. Porém, esta medida não permite saber se o restante do tempo é gasto com atividades necessárias, que mesmo não agregando valor devem ser realizadas, ou esperas, que não cumprem função alguma no processo de produção.

A expressão apresentada possui como pressuposto a independência entre suas variáveis. Caso isto fosse verdadeiro, a alteração no número de operadores alteraria linearmente a produção. Como isto não pôde ser observado em todos os casos simulados, buscou-se explorar quais fatores associados à alteração no número de operadores estavam também relacionados com as outras variáveis, resultando na não-linearidade observada na simulação. A partir dos casos estudados, foram destacadas 3 fontes de não-linearidade: (i) o balanceamento entre os operadores; (ii) a relação entre os operadores e o tempo de ciclo automático dos equipamentos; e (iii) a alteração nos deslocamentos dos operadores. As variáveis da equação e as fontes de não-linearidade evidenciadas estão representadas na Figura 47, ilustrando a interação entre estas.

A alteração no número de operadores pressupõe a definição de uma nova distribuição de atividades entre os operadores, representadas por um novo trabalho padrão. Este novo trabalho padrão promove outras relações entre operadores e entre operadores e equipamentos. Estas novas relações alteram a utilização dos operadores e a quantidade de trabalho por peça. Com relação ao tempo disponível, a alteração no número de operadores de fato não influi nesta variável, pois ela é arbitrária, correspondendo ao período de uma hora nos casos analisados.

Na Tabela 29, pode-se observar o percentual de utilização dos operadores para os três casos, obtidos pela simulação. Em todos os casos observa-se uma maior utilização dos operadores no cenário alternativo, com dois operadores, do que no cenário atual, com três operadores. Isto em parte é explicado pela redução no tempo de espera dos operadores, seja espera por outro operador ou pelo equipamento.

Idealmente, o operador sempre estará realizando uma operação manual ou um deslocamento necessário. Esta condição não irá ocorrer, por exemplo, quando houver um desbalanceamento entre os operadores. O desbalanceamento entre os operadores indica que

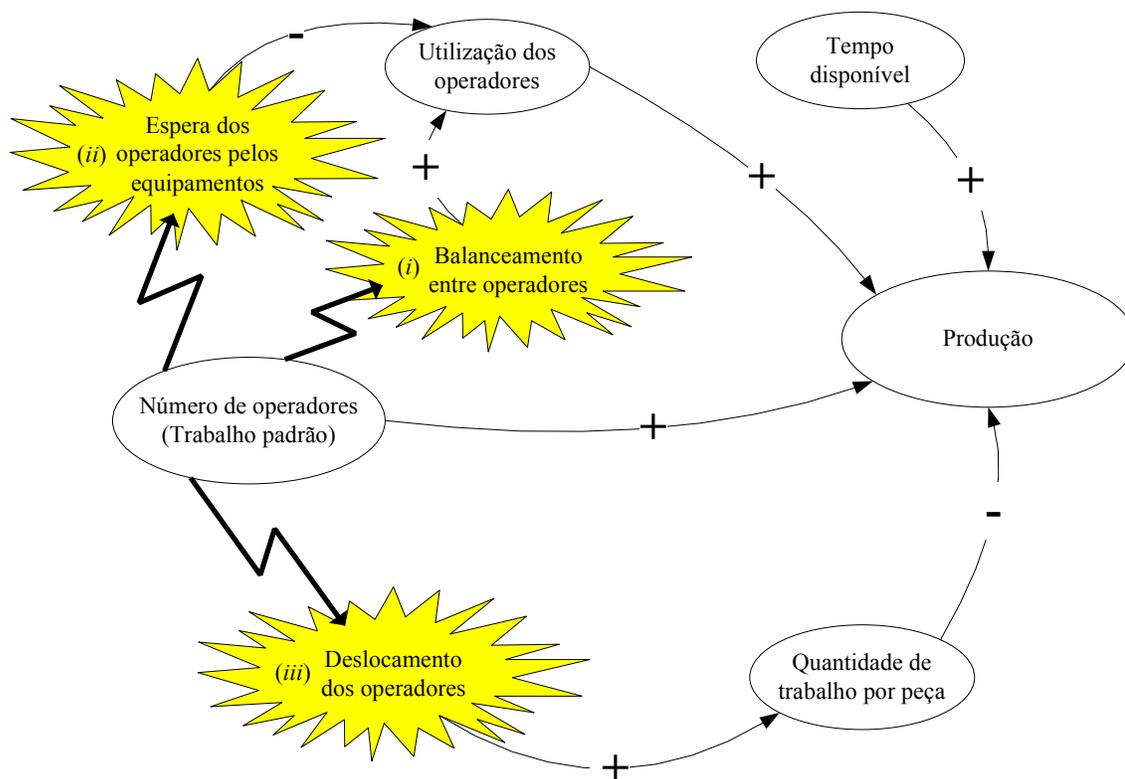


Figura 47: Fatores de influência na linearidade da mão-de-obra.  
Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

Tabela 29: Percentual de utilização dos operadores nos três casos.

	<b>3 Op.</b>	<b>2Op.</b>	<b>Diferença</b>
Caso 1	93,89	97,17	3,28
Caso 2	63,25	76,70	13,45
Caso 3	44,14	68,32	24,18

Fonte: elaborado pelo autor, 2009.

um dos operadores possui maior tempo de atividade e deslocamentos que os demais. Desse modo, em algum momento os outros operadores deverão esperá-lo para dar seguimento a suas atividades. Se ao alterar o número de operadores for obtido um melhor balanceamento, este tempo de espera diminuirá. Conseqüentemente, os operadores permanecerão uma parcela maior do tempo disponível executando atividades manuais ou deslocamentos necessários. Isto implica numa maior utilização dos operadores, conduzindo a não-linearidade (i) ilustrada na Figura 47. A relação entre o balanceamento entre operadores da célula e a produção da célula já foi observada por Cesani e Steudel (2005), reforçando a relação do balanceamento com a não-linearidade observada.

Ainda, operações que não ocorrem a todo ciclo promovem desbalanceamento entre os operadores, pois alguns ciclos do operador serão mais demorados. Exemplo deste

fenômeno são as inspeções e trocas de inserto no segundo caso, e a colocação das peças no óleo no terceiro caso.

Conforme apresentado no capítulo 2, o balanceamento nas células possui vantagens com relação à organização em linhas, pois o balanceamento ocorre nos operadores e não nos postos de trabalho (NAKADE; NISHIWAKI, 2008; BLACK, 2007). Sob este aspecto, a célula pode obter vantagens com relação às linhas na obtenção da linearidade da mão-de-obra, pois a influência do balanceamento poderá ser melhor administrada. Com relação aos desbalanceamentos devido a atividades que não ocorrem a todo ciclo, estas devem ser evitadas para que não ocorra o desbalanceamento. Este procedimento também é recomendado na literatura (ROTHER; HARRIS, 2002), sugerindo a consistência do resultado obtido.

Através dos casos 2 e 3 pode-se ilustrar a segunda fonte de não-linearidade identificada: a espera dos operadores pelos equipamentos, ver Figura 47 (ii). Novamente, esta influência é percebida através da alteração na utilização dos operadores. Idealmente, após acionar o ciclo automático de um dado equipamento, o operador deve seguir sua seqüência de atividades até retornar ao mesmo equipamento. Caso o ciclo automático deste não tenha terminado até o seu retorno, o operador deverá esperar, e quanto maior esta espera, menor a utilização do operador.

No cenário atual dos casos 2 e 3, o tempo de operação manual mais deslocamento dos operadores era inferior ao tempo de ciclo automático dos equipamentos. Em decorrência, cada ciclo era preenchido com um tempo de espera por parte dos operadores. Ao reduzir o número de operadores, o tempo de atividade manual mais deslocamentos de cada operador aumentou, reduzindo a espera pelos equipamentos. Isto resultou no aumento da utilização dos operadores, alterando a linearidade. Novamente, a preocupação com o tempo de ciclo automático dos equipamentos é encontrada em Rother e Harris (2002), porém não relacionada explicitamente com a alteração na linearidade da mão-de-obra.

Outras fontes de não-linearidade podem atuar sobre a quantidade de trabalho necessária para os operadores fabricarem uma peça. Este fato foi observado através do aumento das distâncias de deslocamento dos operadores nas células. Com o aumento do deslocamento, o tempo total de trabalho dos operadores (atividades manuais e deslocamentos) para produzir uma peça aumenta, logo, a quantidade de peças produzidas em um dado período diminui, ver Figura 47 (iii). Nesta situação, mesmo mantendo constante a utilização dos operadores, haverá uma diminuição do número de peças produzidas por unidade de tempo. Porém, este efeito não pôde ser percebido nos resultados porque foi compensado pelo

aumento na utilização dos operadores, devido ao melhor balanceamento e à redução das esperas pelos equipamentos.

Esta alteração nos deslocamentos dos operadores é decorrente da interação entre o novo trabalho padrão e o *layout* da célula. A necessidade de um *layout* adequado para a alteração no número de operadores já foi abordada na literatura por Monden (1984), que propõe o uso de layout em U para as células, visando promover um maior número de opções de alocação de atividades entre os operadores (discutido no balanceamento) e a diminuição dos deslocamentos do operador no retorno para início de um novo ciclo. Opções de arranjo com operadores isolados dificultam a distribuição de atividades entre os operadores e conduzem a maiores movimentações. Isto pôde ser percebido no segundo caso, que apresentou o maior aumento no tempo de deslocamento (11,03s).

A partir do exposto, percebe-se que a menor diferença de produtividade entre os cenários, observada no caso 1, ver Tabela 28, decorre do baixo tempo de ciclo dos equipamentos e do seu *layout*. Em contraposição, nos casos 2 e 3, onde o tempo de ciclo dos equipamentos está próximo do tempo de ciclo da célula e os *layouts* não são os recomendados, observou-se uma variação na produtividade dos operadores. Ainda, o fato de no cenário atual do caso 1 os operadores possuírem uma utilização de aproximadamente 94%, ver Tabela 29, indica um menor potencial de ganho nesta célula. Já nos casos 2 e 3, devido à menor utilização dos operadores, 63% e 44%, respectivamente, possibilitou o aparecimento de uma produção acima do esperado devido ao aumento na utilização.

O desgaste físico dos operadores não pode ser analisado nos resultados da simulação uma vez que este não foi modelado no cenário alternativo. Contudo, a partir da comparação da produção simulada no cenário alternativo e das estimativas obtidas nas entrevistas para a célula com dois operadores, observou-se a influência do desgaste físico dos operadores na produção da célula. Como comentado nos casos 2 e 3, a aparente causa da diferença entre os resultados do modelo e as estimativas empíricas foi a não modelagem deste fator. Tal fato sugere a influência do desgaste físico dos operadores sobre a produção por hora da célula.

O fato de o desgaste físico existir num primeiro momento da alteração no número de operadores pode ser gerado pelo excesso de espera com o qual estes estão acostumados. Observando o relato da entrevista do caso 1, em ocasiões de mudança a empresa busca operadores de outros setores para validar o trabalho padrão, uma alternativa para tirar o viés do hábito dos operadores. Porém, através de avaliações ergonômicas apropriadas, deve-se avaliar se o esforço físico necessário está acima do suportável pelos operadores ou se está

distorcido pelo condicionado deles. E, caso seja necessário um tempo de descanso por ciclo de trabalho realizado, este deve estar especificado como parte do trabalho padrão.

De modo geral, o reflexo dos ganhos na utilização dos operadores, Tabela 29, pode ser percebido no número de peças produzidas por hora na célula, Tabela 28. Estes ganhos compensaram o aumento da quantidade de trabalho por peça devido ao maior deslocamento dos operadores. Assim, a alteração na utilização dos operadores, em especial nos casos 2 e 3, implicou na não observação da hipótese de linearidade da mão-de-obra via simulação. Entretanto, conforme o exposto, o contexto para obtenção da linearidade da mão-de-obra é mais complexo, pois os efeitos de diferentes fontes de não-linearidade podem se sobrepor, como visto nos casos estudados.

Portanto, no contexto das células não se verifica uma relação linear entre o número de operadores e a produção da célula. Esta relação apresenta características não-lineares que, eventualmente, podem resultar em um aparente comportamento linear. Para que este seja observado, deve-se considerar os seguintes fatores: o balanceamento entre os operadores; a relação entre os operadores e o tempo de ciclo automático dos equipamentos; e a alteração nos deslocamentos dos operadores. Com relação ao balanceamento entre os operadores e a relação entre os operadores e o tempo de ciclo automático dos equipamentos, estes influenciam a utilização dos operadores, que altera a produção da célula. Já a alteração dos deslocamentos influencia na quantidade de trabalho dos operadores necessária para produzir uma peça. Mesmo que estes fatores possam ser controlados, a observação da linearidade não pode ser assegurada, visto que outros fatores poderão surgir de modo a resultar em um comportamento não-linear.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo geral estudar a aderência entre o comportamento linear previsto pela literatura para as células e o comportamento observado nas implementações de células em empresas do setor metal-mecânico, através do uso da simulação computacional. Para tal fim, foram selecionadas três células que possuíam o arranjo dos equipamentos segundo as necessidades de processamento dos produtos, característica considerada fundamental para caracterização das células. Tais células atendiam pelo menos parcialmente as características de fluxo contínuo e independência das células. Estas também possuíam características de células de fabricação, onde os equipamentos possuíam ciclo automático e os operadores trabalhavam realizando a descarga, carga e acionamento dos equipamentos.

Utilizando-se a simulação computacional, para cada célula estudada, foi gerado um cenário do estado atual, representando o funcionamento observado na célula, e um cenário alternativo, representando a alteração no número de operadores. Para os três casos, o cenário atual era constituído de três operadores por célula e o cenário alternativo por dois operadores por célula.

A análise da linearidade foi realizada com base na produção por hora das células. A partir dos resultados obtidos para a produção por hora da célula no cenário atual (três operadores) foram estimados os valores esperados pela hipótese de linearidade da mão-de-obra para o cenário alternativo (dois operadores). Comparando-se as estimativas realizadas através da hipótese de linearidade e os resultados obtidos na simulação do cenário alternativo, avaliou-se a linearidade da mão-de-obra.

O primeiro objetivo específico definido foi verificar se as células estudadas apresentavam resultados que denotassem um comportamento linear. Entre os três casos observados, apenas no primeiro a célula apresentou uma relação linear entre a produção por hora e o número de operadores. Nos outros casos, 2 e 3, a célula apresentou um comportamento não-linear. Portanto, concluiu-se que a linearidade da mão-de-obra não ocorre em todas as implementações de células e que a relação entre o número de operadores e a produção da célula apresenta características não-lineares.

O segundo objetivo específico definido foi buscar explicações para a ocorrência ou não do comportamento linear nas células. Uma vez identificado que a linearidade da mão-de-obra não ocorre em todos os casos, e que a relação existente é não-linear, procurou-se identificar as fontes desta não-linearidade. Foram identificadas três fontes de não-linearidade

a partir dos casos estudados: (i) o balanceamento entre os operadores; (ii) a relação entre os operadores e o tempo de ciclo automático dos equipamentos; e (iii) a alteração nos deslocamentos dos operadores.

Tanto o balanceamento entre operadores quanto a relação entre os operadores e o tempo de ciclo dos equipamentos atuam sobre a utilização dos operadores da célula. Uma vez que a utilização da mão-de-obra é alterada, altera-se a produção por hora da célula. Assim, ao alterar o número de operadores, alterou-se o balanceamento entre eles e as relações entre os operadores e o tempo de ciclo automático dos equipamentos. Logo, observou-se um comportamento não-linear com a alteração no número de operadores.

Já a alteração nos deslocamentos dos operadores atua alterando a quantidade de trabalho dos operadores necessária para fabricar uma peça, que possui relação com a produção por hora. Desse modo, ao alterar o número de operadores, os deslocamentos necessários podem ser alterados também, resultando num comportamento não-linear da produção.

Portanto, a relação não-linear entre o número de operadores e a produção da célula pôde ser observada nos casos estudados através da relação entre o número de operadores e outras variáveis que afetam a produção das células: a utilização dos operadores e a quantidade de trabalho necessário para produzir uma peça (incluindo operações manuais e deslocamentos). A observação de um comportamento aparentemente linear pode ser buscada através da observação atenta do balanceamento entre os operadores, da relação entre os operadores e o tempo de ciclo automático dos equipamentos e da alteração nos deslocamentos dos operadores. Entretanto, nesta busca, outros fatores poderão surgir, trazendo novamente a tona um comportamento não-linear.

Finalmente, alguns aspectos não explorados neste trabalho ficam como sugestões para trabalhos futuros. A modelagem das células observadas não pôde incluir o desgaste físico dos operadores. Estudo de casos que possam incluir este aspecto na modelagem poderiam analisar a contribuição de cada fonte de não-linearidade no desempenho da célula. Ainda, fica a sugestão de inclusão do tempo de *setup* na modelagem da célula. A inclusão deste fator poderia estender os resultados para uma situação de maior complexidade.

## REFERÊNCIAS

- ABDUL-KADER, Walid; GHARBI, Ali. Capacity estimation of a multi-product unreliable production line. **International Journal of Production Research**, London, v. 40, n. 18, p. 4815–4834, dez. 2002.
- AGARWAL, Atul; SARKIS, Joseph. A review and analysis of comparative performance studies on functional and cellular manufacturing layouts. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 34, n. 1, p. 77-89, jan. 1998.
- AHMED, N. U.; MONTAGNO, R. V.; FIRENZE, R. J. Operations strategy and organizational performance: an empirical study. **International Journal of Operations and Production Management**, Bingley, v. 16, n. 5, p. 41–53, 1996.
- ARZI, Y.; BUKCHIN, J.; MASIN, M. An efficiency frontier approach for the design of cellular manufacturing systems in a lumpy demand environment. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 134, n. 2, p. 346-364, out. 2001.
- ASKIN, R. G.; HUANG, Y. Forming effective worker teams for cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**, London, v. 39, n. 11, p. 2431–2451, jul. 2001
- ASKIN, R. G.; SELIM, H. M.; VAKHARIA, A. J. A methodology for designing flexible cellular manufacturing systems. **IIE Transactions**, Norcross, v. 29, n. 7, p. 599–610, jul. 1997.
- AYAĞ, Z. A hybrid approach to machine-tool selection through AHP and simulation. **International Journal of Production Research**, London, v. 45, n. 9, p. 2029–2050, mai. 2007.
- BALAKRISHNAN, J.; CHENG, C. H. Multi-period planning and uncertainty issues in cellular manufacturing: a review and future directions. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 177, n. 1, p. 281–309, fev. 2007.
- BALCI, Osman. Verification, validation, and Testing. In: BANKS, Jerry (Org.) **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. New York: John Wiley and Sons, 1998, cap. 10.
- BALLÉ, F.; BALLÉ, M. Feel the force of flexible manpower. **Manufacturing Engineer**, London, v. 84, n. 6, p. 20–25, dez. 2005.
- BANKS, Jerry. Principles of simulation. In: \_\_\_\_\_. **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. New York: John Wiley and Sons, 1998, cap. 1.
- BANKS, Jerry; CARSON, John S.; NELSON, Barry L. **Discrete-event system simulation**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996.
- BANKS, Jerry; GIBSON, Randall. Don't simulate when... 10 rules for determining when simulation is not appropriate. **IIE Solutions**, Norcross, v. 29, n. 9, p. 30-32, set. 1997.

BHANDWALE, A.; KESAVADAS, T. A methodology to incorporate product mix variations in cellular manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, New York, v. 19, n. 1, p. 71–85, fev. 2008.

BHATNAGAR, Rohit; CHANDRA, Pankaj. Variability in assembly and competing systems: effect on performance and recovery. **IIE Transactions**, Norcross, v. 26, n. 5, p. 18-31, set. 1994.

BILAS, R. A. **Teoria microeconômica: uma análise gráfica**. Rio de Janeiro: Forense-Universitária, 1991.

BLACK, J T. Design rules for implementing the Toyota Production System. **International Journal of Production Research**, London, v. 45, n. 16, p. 3639-3664, ago. 2007.

BLACK, J T. **The design of the factory with a future**. New York: McGraw-Hill, 1991.

BLACK, J. T.; SCHROER, B. J. Simulation of an apparel assembly cell with walking workers and decouplers. **Journal of Manufacturing Systems**, Dearborn, v. 12, n. 2, p. 170–180, 1993.

BULLINGER, H.-J.; SCHWEIZER, W. Intelligent production-competition strategies for production enterprises. **International Journal of Production Research**, London, v. 44, n. 18-19, p. 3575-3584, set. 2006.

BURBIDGE, John L. Change to group technology: process organization is obsolete. **International Journal of Production Research**, London, v. 30, n. 5, p. 1209-1219, mai. 1992.

BURBIDGE, John L. Production Flow Analysis for planning group technology. **Journal of Operations Management**, Amsterdam, v. 10, n.1, p. 5-27, jan. 1991.

BURGESS, A. G.; MORGAN, I.; VOLLMANN, T.E. Cellular manufacturing: its impact on the total factory. **International Journal of Production Research**, London, v. 31, n. 9, p. 2059-2077, set. 1993.

CAO, Q.; PATTERSON, J. W.; BAI, X. Reexamination of processing time uncertainty. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 164, n. 1, p. 185-194, jul. 2005.

CAO, Q.; PATTERSON, J. W.; GRIFFIN, T. E. On the operational definition of processing time uncertainty. **International Journal of Production Research**, London, v. 39, n. 13, p. 2833–2849, set. 2001.

CARSON, John S. Model verification and validation. In: YÜCESAN, E.; CHEN, C.-H.; SNOWDON, J. L.; CHARNES, J. M. (Org.) **Proceedings of the 2002 winter simulation conference**. San Diego: Winter Simulation Conference, 2002, p. 52-58.

CESANÍ, V. I.; STEUDEL, H. J. A study of labor assignment flexibility in cellular manufacturing systems. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 48, n. 3, p. 571–591, mai. 2005.

CHTOUROU, H.; JERBI, A.; MAALEJ, A. Y. The cellular manufacturing paradox: a critical review of simulation studies. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 19, n. 5, p. 591–606, 2008.

DJASSEMI, M. A simulation analysis of factors influencing the flexibility of cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**, London, v. 43, n. 10, p. 2101-2111, mai. 2005.

EKREN, B. Y.; ORNEK, A. M. A simulation based experimental design to analyze factors affecting production flow time. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Amsterdam, v. 16, n. 3, p. 278–293, mar. 2008.

ELLEUCH, M.; BACHA, H. B.; MASMOUDI, F.; MAALEJ, A. Y. Analysis of cellular manufacturing systems in the presence of machine breakdowns: effects of intercellular transfer. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 19, n. 2, p. 235–252, 2008.

ERTAY, T.; RUAN, D. Data envelopment analysis based decision model for optimal operator allocation in CMS. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 164, n. 3, p. 800–810, ago. 2005.

ETHIRAJ, S. K.; LEVINTHAL, D. Modularity and innovation in complex systems. **Management Science**, Providence, v. 50, n. 2, p. 159-173, fev. 2004.

GAITHER, Norman; FRAZIER, Gregory V.; WEI, Jerry C. From Job Shop to Manufacturing Cells. **Production and Inventory Management Journal**, Falls Church, v. 31, n. 4, p. 33-37, 1990.

GARZA, Oscar; SMUNT, Timothy L. Countering the Negative Impact of Intercell Flow in Cellular Manufacturing. **Journal of Operations Management**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 92-118, jan. 1991.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GRIMARD, Carrie; MARVEL, Jon H.; STANDRIDGE, Charles R. Validation of the re-design of a manufacturing work cell using simulation. In: KUHL, M. E.; STEIGER, N. M.; ARMSTRONG, F. B.; JOINES, J. A. (Org.) **Proceedings of the 2005 winter simulation conference**. Orlando: Winter Simulation Conference, 2005, p. 1386-1391.

GROOVER, Mikell P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

GUPTA, Surendra M.; AL-TURKI, Yousef A.Y.; PERRY, Ronald F. Flexible kanban system. **International Journal of Operations and Production Management**, Bingley, v. 19, n. 10, p. 1065-1093, 1999.

GUPTA, Uma G. Using citation analysis to explore the intellectual base, knowledge dissemination, and research impact of Interfaces (1970-1992). **Interfaces**, Providence, v. 27, n. 2, p. 85-101, mar. 1997.

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M.; BORROR, C. M. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HOLLOCKS, B. W. Forty years of discrete-event simulation: a personal reflection. **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, v. 57, n. 12, p. 1383-1399, dez. 2006.

HYER, Nancy L.; BROWN, Karen A. The discipline of real cells. **Journal of Operations Management**, Amsterdam, v. 17, n. 5, p. 557-574, ago. 1999.

HYER, Nancy L.; WEMMERLÖV, Urban. **Reorganizing the factory**: competing through cellular manufacturing. New York: Productivity Press, 2002.

JOHNSON, Danny J. Converting assembly lines to assembly cells at Sheet Metal Products: insights on performance improvements. **International Journal of Production Research**, London, v. 43, n. 7, p. 1483-1509, abr. 2005.

JOHNSON, D. J.; WEMMERLÖV, U. Why does cell implementation stop? Factors influencing cell penetration in manufacturing plants. **Production and Operations Management**, Baltimore, v. 13, n. 3, p. 272-289, outono 2004.

JOHNSON, Danny J.; WEMMERLÖV, Urban. On the relative performance of functional and cellular layouts – an analysis of the model-based comparative studies literature. **Production and Operation Management**, Baltimore, v. 5, n. 4, p. 309-334, inverno 1996.

KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P. **Operations management**: strategy and analysis. 5. ed. New York: Addison-Wesley, 1999.

LANE, Michael S.; MANSOUR, Ali H.; HARPELL, John L. Operations research techniques: a longitudinal update 1973-1988. **Interfaces**, Providence, v. 23, n. 2, p. 63-68, mar. 1993.

LAW, Averill M. How to build valid and credible simulation models. In: PERRONE, L. F.; WIELAND, F. P.; LIU, J.; LAWSON, B. G.; NICOL, D. M.; FUJIMOTO, R. M. (Org.) **Proceedings of the 2006 winter simulation conference**. Monterey: Winter Simulation Conference, 2006, p. 58-66.

LAW, Averill M. **Simulation modeling and analysis**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

LI, Jing-Wen. Investigating the efficacy of exercising JIT practices to support pull production control in a job shop environment. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 16, n. 7, p. 765-783, 2005.

MILTENBURG, J. One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: a tutorial. **IIE Transactions**, Norcross, v. 33, n. 4, p. 303-321, abr. 2001a.

\_\_\_\_\_. U-shaped production lines: a review of theory and practice. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 70, n. 3, p. 201-214, abr. 2001b.

MONDEN, Yasuhiro. **Sistema Toyota de produção**. São Paulo: Instituto de Movimentação e Armazenamento de Materiais, IMAM, 1984

MOREIRA, D. A. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

MORRIS, John S.; TERSINE, Richard J. A simulation comparison of process and cellular layouts in a dual resource constrained environment. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 26, n. 4, p. 733-741, out. 1994.

MUSSELMAN, Kenneth J. Guidelines for success. In: BANKS, Jerry (Org.) **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. New York: John Wiley and Sons, 1998, cap. 22.

NAKADE, K; NISHIWAKI, R. Optimal allocation of heterogeneous workers in a U-shaped production line. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 54, n. 3, p. 432-440, abr. 2008.

NANCE, Richard E.; SARGENT, Robert G. Perspectives on the evolution of simulation. **Operations Research**, Baltimore, v. 50, n. 1, p. 161-172, jan.-fev. 2002.

OLIVEIRA, Carlos Machado; CARVALHO, Marcius Fabius Henriques. Análise de políticas de gestão em cadeias de suprimentos por modelos de simulação. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 11, n. 3, p. 313-329, set.-dez. 2004.

OPTIZ, H.; WIENDAHL, H.P. Group technology and manufacturing systems for small and medium quantity production. **International Journal of Production Research**, London, v. 9, n. 1, p. 181-203, 1971.

PIDD, Michael. **Computer simulation in management science**. 5. ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2004.

PILLAI, V. M.; SUBBARAO, K. A robust cellular manufacturing system design for dynamic part population using a genetic algorithm. **International Journal of Production Research**, London, v. 46, n. 18, p. 5191-5210, set. 2008.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Microeconomia**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2006.

PITCHUKA, Leela Nagasrinivasarao; ADIL, Gajendra Kumar; ANANTHAKUMAR, Usha. Effect of conversion of functional layout to a cellular layout on the queue time performance: some new insights. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Guildford, v. 31, n. 5-6, p. 594-601, dez. 2006.

POWELL, Stephen G.; PYKE, David F. Allocation of buffers to serial production lines with bottlenecks. **IIE Transactions**, Norcross, v. 28, n. 1, p. 18-29, jan. 1996.

PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM. **Cellular manufacturing: one-piece flow for workteams**. Portland: Productivity Press, 1999.

ROBINSON, Stewart. Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next? **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, v. 56, n. 6, p. 619-629, jun. 2005.

ROTHER, M.; HARRIS, R. **Criando Fluxo Contínuo**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2002.

SANTOS, Antonio Raimundo dos. **Metodologia científica: a construção do conhecimento**. 3. ed. Rio de Janeiro: DP&A, 2000.

SARGENT, Robert G. Verification and validation of simulation models. In: KUHL, M. E.; STEIGER, N. M.; ARMSTRONG, F. B.; JOINES, J. A. (Org.) **Proceedings of the 2005 winter simulation conference**. Orlando: Winter Simulation Conference, p. 130-143, 2005.

SARKER, Bhaba R.; FITZSIMMONS, James A. The performance of push and pull systems: a simulation and comparative study. **International Journal of Production Research**, London, v. 27, n. 10, p. 1715–1731, out. 1989.

SAVSAR, Mehmet; AL-JAWINI, Abdullah. Simulation analysis of just-in-time production systems. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 42, n. 1, p. 67-78, nov. 1995.

SCHALLER, J. Designing and redesigning cellular manufacturing systems to handle demand changes. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 53, n. 3, p. 478–490, out. 2007.

SHAFER, S. M.; CHARNES, J. M. A simulation analyses of factors influencing loading practices in cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**, London, v. 33, n. 1, p. 279-290, jan. 1995.

SHEWCHUK, J. P. Worker allocation in lean U-shaped production lines. **International Journal of Production Research**, London, v. 46, n. 13, p. 3485 – 3502, jul. 2008.

SILVEIRA, Giovani. **Uma metodologia de implantação da manufatura celular**. 1994. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SLOMP, J.; BOKHORST, J. A. C.; MOLLEMAN, E. Cross-training in a cellular manufacturing environment. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 48, n. 3, p. 609–624, mai. 2005.

SO, K. C. The impact of buffering strategy on the performance of production line systems. **International Journal of Production Research**, London, v. 28, n. 12, p. 2293–2307, dez. 1990.

STEVENSON, William J. **Estatística aplicada à administração**. São Paulo: Harbra, 2001.

SURESH, Nallan C.; MEREDITH, Jack R. Coping with the loss of pooling synergy in cellular manufacturing systems. **Management Science**, Providence, v. 40, n. 4, p. 466-483, abr. 1994.

SUWANRUJI, P.; ENNS, S. T. Evaluating the effects of capacity constraints and demand patterns on supply chain replenishment strategies. **International Journal of Production Research**, London, v. 44, n. 21, p. 4607–4629, nov. 2006.

TSUBONE, H.; ISHIKAWA, Y.; YAMAMOTO, H. Production planning system for a combination of make-to-stock and make-to-order products. **International Journal of Production Research**, London, v. 40, n. 18, p. 4835–4851, dez. 2002.

TURNER, Wayne C.; MIZE, Joe H.; CASE, Kenneth E.; NAZEMETZ, John W. **Introduction to Industrial and Systems Engineering**. 3. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.

WATERSON, P. E.; CLEGG, C. W.; BOLDEN, R.; PEPPER, K.; WARR, P. B.; WALL, T. D. The use and effectiveness of modern manufacturing practices: a survey of UK industry. **International Journal of Production Research**, London, v. 37, n. 10, p. 2271–2292, jul. 1999.

WEMMERLÖV, Urban; HYER, Nancy L. Cellular manufacturing in the U.S. industry: a survey of users. **International Journal of Production Research**, London, v. 27, n. 9, p. 1511-1530, set. 1989.

WEMMERLÖV, Urban; JOHNSON, Danny J. Cellular manufacturing at 46 user plants: implementation experiences and performance improvements. **International Journal of Production Research**, London, v. 35, n. 1, p. 29–49, jan. 1997.

WEMMERLÖV, Urban; JOHNSON, Danny J. Empirical findings on manufacturing cell design. **International Journal of Production Research**, London, v. 38, n. 3, p. 481-507, fev. 2000.

YAZICI, Hulya Julie. Influence of flexibilities on manufacturing cells for faster delivery using simulation. **Journal of Manufacturing Technology Management**, Bingley, v. 16, n. 8, p. 825-841, 2005.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ZEIGLER, Bernard P. **Theory of modelling and simulation**. New York: John Wiley and Sons, 1976.

**APÊNDICE A – Caso 1**

## A.1 Dados coletados para o operador 1: Caso 1

	<b>Op1At1</b>	<b>Op1Mov1</b>	<b>Op1Mov2</b>	<b>Op1At2</b>	<b>Op1Mov3</b>	<b>Op1At3</b>
1	16,68	9,29	2,42	2,43	3,11	10,78
2	17,30	8,66	2,48	2,52	4,94	11,37
3	27,19	6,19	0,65	4,32	4,32	11,46
4	16,19	2,60	2,53	4,34	3,06	12,70
5	16,06	4,34	1,83	3,69	2,98	11,43
6	22,27	2,44	1,85	3,72	4,97	12,78
7	16,72	6,19	2,41	3,15	3,73	11,59
8	16,15	6,22	3,10	1,87	2,51	13,32
9	17,93	5,57	1,87	3,70	2,47	11,35
10	19,18	6,79	2,54	1,87	3,21	10,89
11	18,96	12,36	1,79	3,08	4,32	10,97
12	20,40	8,04	2,39	3,10	2,47	11,02
13	17,33	7,42	2,49	4,97	4,94	12,21
14	16,70	6,19	2,56	2,51	3,67	12,01
15	17,95	5,54	2,43	3,72	3,63	12,67
16	17,90	9,29	1,25	3,12	2,53	11,41
17	18,55	6,17	1,91	3,77	3,10	11,89
18	17,22	6,19	1,84	3,82	3,81	11,26
19	16,59	10,51	1,83	4,32	2,48	11,45
20	21,02	3,10	1,77	3,75	1,86	12,73
21	19,75	3,38	1,99	4,44	2,74	12,86
22	18,91	3,53	3,38	3,48	2,88	12,05
23	15,67	4,03	1,99	4,73	2,64	11,66
24	20,16	3,38	2,76	4,20	2,28	13,70
25	18,22	5,33	3,05	3,74	2,28	13,03
26	17,93	4,63	2,45	3,74	3,12	11,98
27	17,71	2,11	2,16	3,60	3,17	15,12
28	23,02	2,33	2,23	3,96	3,72	13,70
29	17,33	3,82	2,45	3,89	3,05	13,01
30	24,84	2,57	1,92	3,84	3,17	18,26
31	16,73	4,73	2,16	3,82	2,28	12,36
32	17,40	5,18	2,28	4,30	3,17	12,96
33	19,94	3,36	2,59	3,91	3,41	14,38
34	18,98	4,87	1,63	4,34	2,66	16,32
35	17,16	3,14	2,59	3,60	2,74	12,19
36	21,29	4,03	2,30	3,60	2,64	10,78
37	20,76	5,09	2,38	4,56	3,41	11,76
38	22,34	4,58	1,99	3,98	3,10	12,14
39	18,38	6,00	2,59	4,42	3,41	13,61
40	16,13	5,18	3,12	3,74	1,99	13,56

## A.2 Dados coletados para o operador 2: Caso 1

	<b>Op2At1</b>	<b>Op2Mov1</b>	<b>Op2At2</b>	<b>Op2Mov2</b>	<b>Op2At3</b>	<b>Op2Mov3</b>
1	4,06	4,66	16,73	4,32	18,89	4,51
2	4,99	3,48	18,84	5,35	14,14	2,88
3	7,06	5,35	17,11	4,80	13,58	2,11
4	6,07	2,88	25,73	5,81	14,81	5,40
5	5,35	3,10	18,70	4,68	16,73	2,38
6	8,88	3,55	20,45	2,76	16,08	1,94
7	8,45	2,95	18,74	4,49	18,22	1,90
8	5,52	3,60	14,71	3,43	14,62	1,61
9	6,19	4,06	16,58	4,10	18,14	2,21
10	5,83	3,91	15,36	3,72	15,53	1,82
11	6,84	5,57	16,63	4,78	12,17	2,71
12	5,59	6,34	17,23	4,92	16,73	1,61
13	6,60	6,53	20,40	4,18	15,17	1,15
14	8,93	7,97	19,70	4,25	15,43	1,39
15	7,85	4,32	20,14	3,65	19,58	1,30
16	6,50	4,63	16,92	4,46	20,09	1,54
17	6,46	3,84	16,15	5,14	15,74	2,06
18	8,50	5,14	25,58	4,42	12,89	1,39
19	8,35	4,78	16,01	4,01	11,86	0,84
20	6,74	4,80	21,24	5,38	16,34	1,68
21	7,42	3,96	15,79	4,99	16,06	2,14
22	6,46	7,18	19,92	3,65	19,13	1,97
23	7,75	6,31	17,69	3,26	16,44	1,97
24	6,70	6,00	24,62	4,49	11,62	0,84
25	6,17	6,96	14,21	4,10	17,54	2,06
26	5,59	8,21	14,30	3,58	29,47	1,44
27	7,99	8,23	25,46	3,82	16,13	1,75
28	7,15	3,94	17,38	2,69	19,80	1,68
29	6,79	9,91	19,34	2,59	9,67	0,86
30	7,66	7,01	16,25	3,34	15,31	2,28
31	6,05	3,48	14,64	4,49	15,53	2,50
32	6,79	6,10	16,37	3,72	13,42	1,54
33	5,66	7,85	10,42	5,09	10,80	1,08
34	7,44	5,86	16,80	3,12	14,33	1,82
35	4,87	3,53	17,04	3,55	13,37	0,91
36	6,14	4,30	14,71	3,43	12,60	1,75
37	6,31	5,50	15,50	4,01	14,93	1,75
38	6,38	3,38	20,52	3,29	23,76	1,75
39	5,38	8,16	13,90	2,98	18,53	1,30
40	7,78	5,40	16,82	3,79	17,47	0,94

## A.3 Dados coletados para o operador 3: Caso 1

	<b>Op3At1</b>	<b>Op3Mov1</b>	<b>Op3At2</b>	<b>Op3Mov2</b>
1	4,13	2,11	39,48	2,74
2	10,63	1,80	41,45	4,63
3	5,52	2,54	44,74	4,18
4	4,42	3,14	41,28	3,89
5	7,73	3,74	36,07	4,51
6	7,01	2,02	36,46	3,31
7	4,42	2,64	42,19	5,02
8	4,37	3,19	45,70	4,37
9	8,04	5,81	43,75	6,14
10	3,77	1,70	41,90	9,26
11	4,61	1,92	39,43	4,61
12	3,91	3,05	34,30	4,37
13	10,78	3,62	39,86	3,84
14	5,78	1,80	36,41	3,96
15	8,76	2,47	39,60	3,65
16	4,30	11,74	39,26	7,30
17	5,78	2,69	60,91	4,75
18	7,03	1,92	32,76	3,62
19	7,54	5,86	35,40	4,82
20	7,56	1,56	39,77	4,06
21	6,96	2,54	32,93	2,90
22	5,50	4,30	35,35	4,44
23	5,28	2,14	36,77	3,53
24	7,27	2,09	36,34	5,23
25	5,16	2,57	36,24	3,41
26	9,36	6,94	41,81	4,15
27	8,45	2,59	32,81	4,39
28	7,03	4,32	34,27	3,67
29	6,00	2,57	32,18	3,91
30	4,75	2,18	32,90	4,63
31	2,95	3,05	30,82	6,65
32	4,82	1,99	36,14	4,39
33	4,58	2,64	37,75	6,26
34	4,01	1,85	37,06	8,23
35	2,62	3,00	42,24	3,43
36	8,16	2,23	31,42	6,31
37	5,59	2,42	36,02	5,57
38	10,06	3,60	36,07	4,13
39	3,94	3,14	33,19	4,54
40	5,42	2,47	32,83	7,90

## A.4 Dados coletados para os equipamentos: Caso 1

	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>
1	12,29	11,33	33,00	34,10	4,58
2	12,00	11,11	33,53	35,16	5,26
3	12,38	10,94	32,93	34,97	4,90
4	12,24	11,09	32,40	35,33	4,94
5	12,00	10,73	32,23	35,54	4,73

#### A.5 Desenvolvimento do modelo computacional: Caso 1

O primeiro passo desta etapa, anterior a programação do modelo desenvolvido, consistiu na análise das diferentes formas de programação que poderiam ser utilizadas para representar tal modelo. Para este fim, foi desenvolvido um modelo constituído de um único operador, uma versão simplificado do modelo de interesse. O objetivo deste modelo era representar a atividade de um operador, compreendendo as seguintes características: o operador deveria chegar ao equipamento segurando uma peça, retirar a peça trabalhada e inserir a peça trazida, deslocando-se em seguida para outro equipamento. Este conjunto de atividades constitui a estrutura básica do modelo a ser simulado e foi analisada individualmente.

Foram analisadas duas opções para a modelagem e programação deste modelo simplificado. Na primeira, o operador era modelado como um recurso e, na segunda, como uma entidade. Entre estas foi escolhida a segunda opção. A razão para esta escolha foi a facilidade de programação e de realocação de atividades entre os operadores. Isto ocorre porque quando o operador é visto como um recurso este é possuído pela entidade, logo, é necessário sincronizar as solicitações dos diversos componentes em processamento na célula, de modo que o operador execute corretamente a seqüência de operações. Como uma entidade, o operador pode possuir outras entidades (componentes em processamento) sendo sua rotina de atividades definida na própria rotina da entidade operador.

Após definido a estrutura de programação do operador, foi construído um modelo determinístico para a célula em estudo, com os tempos médios das atividades e deslocamentos coletados. Este modelo permitiu verificar, para o operador e para a peça, se seus indicadores de tempo de deslocamentos, operação e espera estavam de acordo com os esperados para o caso determinístico.

Nesta primeira avaliação destacou-se o fato do tempo de operação para as peças divergir com a primeira estimativa realizada. Isso ocorreu pelo fato de cada peça ser processada duas vezes na atividade de carga e descarga, a primeira na carga da máquina e a segunda vez ao ser descarregada do equipamento. Inicialmente este tempo foi considerado apenas uma vez por peça, entretanto como o tempo de carga e descarga foi modelado como um só, a peça passa por esta operação duas vezes.

Outro aspecto observado durante a verificação foi a relação entre o tempo de ciclo dos três operadores. Como não existe formação de estoques na célula, o tempo de ciclo dos três operadores deve ser o mesmo. Ainda, este tempo de ciclo deve ser igual ao tempo do

operador com maior tempo total entre atividades e deslocamentos, já que os tempos de ciclo automático dos equipamentos são menores.

Também com este modelo foi possível verificar se o operador iria respeitar a seqüência de operações em condições diversas, através da alteração dos tempos atribuídos às atividades e deslocamentos do operador. Ainda, o modelo com dados determinísticos facilitou a verificação do modelo programado através do acompanhamento uma a uma das instruções executadas pelo programa, pois o instante de ocorrência de todos os eventos é conhecido previamente.

Na terceira etapa da programação foram inseridas as distribuições de probabilidade referentes às atividades e movimentações modeladas. Observou-se a mesma média para o tempo de operação e deslocamento dos operadores, indicando a correta inserção das distribuições de probabilidade. Após esta modificação do modelo foi realizada uma verificação do código programado, apresentado no Apêndice A.6.

Já a programação do modelo alternativo foi realizada a partir da alteração do código gerado para o cenário atual. Desse modo, foram alteradas as seqüências de operações dos operadores e modificações com relação aos tempos de deslocamento. Sobre este modelo também foram verificadas os comportamentos esperados do sistema como descrito para o caso com três operadores. O código do cenário alternativo está apresentado no Apêndice A.7.

## A.6 Código do cenário atual: Caso 1

```
*****
*                               Formatted Listing of Model:                               *
*****
Time Units:                      Seconds
Distance Units:                  Meters
Initialization Logic:           #TRACE STEP
                                WRITE CTm, "Stream: "
                                WRITELINE CTm, Stream
                                WRITE CTm, "Lead Time"
                                WRITELINE CTm, "TC"

*****
*                               Locations                                               *
*****
Name      Cap Units Stats      Rules      Cost
-----
Caixa_Eixo 1 1      Time Series Oldest, ,
E1         1 1      Time Series Oldest, ,
E2         1 1      Time Series Oldest, ,
Suporte   1 1      Time Series Oldest, ,
E3         1 1      Time Series Oldest, ,
E4         1 1      Time Series Oldest, ,
E5         1 1      Time Series Oldest, ,
P_1A      1 1      Time Series Oldest, ,
P_1B      1 1      Time Series Oldest, ,
P_1C      1 1      Time Series Oldest, ,
P_1D      1 1      Time Series Oldest, ,
P_2A      1 1      Time Series Oldest, ,
P_2B      1 1      Time Series Oldest, ,
P_2C      1 1      Time Series Oldest, ,
```

```

P_3A      1  1      Time Series Oldest, ,
P_3B      1  1      Time Series Oldest, ,
P_3C      1  1      Time Series Oldest, ,

*****
*
*                               Entities                               *
*****
Name      Speed (mpm)  Stats      Cost
-----
Eixo      50           Time Series
Junta     50           Time Series
Operador_1 50         Time Series
Operador_2 50         Time Series
Operador_3 50         Time Series

*****
*
*                               Processing                               *
*****
Process
Entity    Location  Operation
-----
Operador_1 P_1A      ORDER 1 Eixo TO Caixa_Eixo
LOAD 1 IFF Processo = 0
GRAPHIC 3
WAIT mOp1At1 SEC
WAIT UNTIL vEquipamento1=0
UNLOAD 1 IFF Processo = 0
GRAPHIC 2
1      Operador_1 P_1B      FIRST 1  MOVE FOR
mOp1Mov1 SEC
Eixo      Caixa_Eixo Processo = 0
Start = CLOCK()
1      Eixo      P_1A      LOAD 1
Eixo      P_1A      1      Eixo      E1      FIRST 1
Eixo      E1      vEquipamento1 = 1
WAIT 12.18 SEC
Processo = 1      1      Eixo      P_1D      LOAD 1  vEquipamento1
= 0
Operador_1 P_1B      GRAPHIC 1
LOAD 1 IFF Processo = 3
GRAPHIC 4
WAIT UNTIL vComponenteE3 = 1
vComponenteE3 = 0
1      Operador_1 P_1C      FIRST 1  MOVE FOR
mOp1Mov2 SEC
Eixo      Suporte  vSuporte = 1
Processo = 3      1      Eixo      P_1B      LOAD 1  vSuporte = 0
Operador_1 P_1C      WAIT mOp1At2 SEC
UNLOAD 1 IFF Processo = 3
GRAPHIC 1      1      Operador_1 P_1D      FIRST 1  MOVE FOR
mOp1Mov3 SEC
Eixo      P_1C      JOIN 1 Junta
1      Eixo      E4      FIRST 1
Eixo      E4      WAIT 35.02 SEC
Processo = 4      1      Eixo      P_2B      LOAD 1
Operador_1 P_1D      LOAD 1 IFF Processo = 1
GRAPHIC 3
WAIT UNTIL vEquipamento2 = 0
WAIT mOp1At3 SEC
UNLOAD 1 IFF Processo = 1
GRAPHIC 1      1*      Operador_1 P_1A      FIRST 1
2      Operador_1 EXIT      FIRST 1
Eixo      P_1D      1      Eixo      E2      FIRST 1
Eixo      E2      vEquipamento2 = 1
WAIT 11.04 SEC
Processo = 2      1      Eixo      P_2A      LOAD 1  vEquipamento2
= 0
Operador_2 P_2A      WAIT mOp2At3 SEC
LOAD 1 IFF Processo = 2
GRAPHIC 3
WAIT UNTIL vSuporte = 0
UNLOAD 1 IFF Processo = 2
GRAPHIC 2      1      Operador_2 P_2B      FIRST 1  MOVE FOR
mOp2Mov3 SEC

```

Eixo	P_2A		1	Eixo	Suporte	FIRST	1
Operador_2	P_2B	GRAPHIC 2 LOAD 1 IFF ENTITY() = 2 LOAD 1 IFF ENTITY() = 1 AND Processo = 4 GRAPHIC 4 WAIT mOp2At1 SEC UNLOAD 1 IFF ENTITY() = 2					
mOp2Mov1	SEC		1	Operador_2	P_2C	FIRST	1 MOVE FOR
Junta	E3	WAIT 32.82 SEC	1	Junta	P_2B	LOAD	1 ORDER 1 Junta TO E3
Junta	P_2B		1	Junta	E4	FIRST	1
Junta	E4	vComponenteE3 = 1					
			1	Junta	P_1C	JOIN	1
Operador_2	P_2C	WAIT UNTIL vEquipamento5 = 0 WAIT mOp2At2 SEC UNLOAD 1 IFF Processo = 4 GRAPHIC 1					
mOp2Mov2	SEC		1*	Operador_2	P_2A	FIRST	1 MOVE FOR
			2	Operador_2	EXIT	FIRST	1
Eixo	P_2C		1	Eixo	E5	FIRST	1
Eixo	E5	vEquipamento5 = 1 GRAPHIC 2 WAIT 4.88 SEC Processo = 5					
= 0			1	Eixo	P_3A	LOAD	1 vEquipamento5
Operador_3	P_3A	LOAD 1 IFF Processo = 5 WAIT mOp3At1 SEC GRAPHIC 2					
mOp3Mov1	SEC		1	Operador_3	P_3B	FIRST	1 MOVE FOR
Operador_3	P_3B	WAIT mOp3At2 SEC					
			1	Operador_3	P_3C	FIRST	1
Operador_3	P_3C	UNLOAD 1 IFF Processo = 5 GRAPHIC 1					
mOp3Mov2	SEC		1*	Operador_3	P_3A	FIRST	1 MOVE FOR
			2	Operador_3	EXIT	FIRST	1
Eixo	P_3C	vLead_Time = CLOCK() - Start vTC = CLOCK() - vLastObservation vLastObservation = CLOCK() WRITE CTm, vLead_Time WRITELINE CTm, vTC					
			1	Eixo	EXIT	FIRST	1

\*\*\*\*\*  
\* Arrivals \*

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Eixo	Suporte	1	0	1	1	
Eixo	E4	1	0	1	1	
Junta	E3	1	0	1	1	
Operador_1	P_1A	1	0	1	1	
Operador_2	P_2B	1	0	1	1	
Operador_3	P_3A	1	0	1	1	

\*\*\*\*\*  
\* Attributes \*

ID	Type	Classification
#Estagio de processamento		
Processo	Integer	Entity
#Entrada da entidade na célula		
Start	Real	Entity

\*\*\*\*\*  
\* Variables (global) \*

ID	Type	Initial value	Stats

```

vTC                Real          0          Time Series
vLead_Time         Real          0          Time Series
vLastObservation  Real          0          Time Series
vComponenteE3     Integer        0          Time Series
vEquipamento1    Integer        0          Time Series
vEquipamento2    Integer        0          Time Series
vEquipamento5    Integer        0          Time Series
vSuporte          Integer        0          Time Series

*****
*                               Macros                               *
*****
ID          Text
-----
Stream      #1 #Warm-up
            #2 #Validação
            #3 #Resultados

mOp1At1     #18.8
            14.8502+IG(8.64161, 3.92327, Stream)

mOp1Mov1    #5.5
            0.64218+4.24695*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./3.47914)

mOp1Mov2    #2.3
            #-17+P5(1.42e+03, 2.72e+04, Stream)
            -16.9618+P5(1417.26, 27207, Stream)

mOp1At2     #3.7
            -16.9481+W(36.822, 20.9509, Stream)

mOp1Mov3    #3.2
            0.778122+IG(22.9898, 2.37113, Stream)

mOp1At3     #12.5
            10.1924+IG(5.35296, 2.32559, Stream)

mOp2At1     #6.7
            -3.43311+P5(78.9753, 788.741, Stream)

mOp2Mov1    #5.3
            2.81887+W(1.36236, 2.71852, Stream)

mOp2At2     #17.8
            4.73239+12.6693*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./7.34274)

mOp2Mov2    #4.1
            2.16852+W(2.65164, 2.13613, Stream)

mOp2At3     #16.1
            3.15565+12.4973*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./7.06432)

mOp2Mov3    #1.9
            0.23562+1.4711*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./3.98185)

mOp3At1     #6.1
            T(2.31647, 4.37773, 11.6635, Stream)

mOp3Mov1    #3.2
            1.56+1.02361*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./1.96861)

mOp3At2     #37.9
            24.9804+P5(8.04306, 90.9776, Stream)

mOp3Mov2    #4.9
            2.74+1.68098*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./2.63063)

*****
*                               External Files                       *
*****
ID          Type          File Name          Prompt
-----
CTm        General Write  C:\...\ Arquivo_Warmup.txt


```

## A.7 Código do cenário alternativo: Caso 1

```

*****
*                               Formatted Listing of Model:         *
*****
Time Units:                Seconds
Distance Units:            Meters
Initialization Logic:      #TRACE STEP
                           WRITE CTm, "Stream: "
                           WRITELINE CTm, Stream
                           WRITE CTm, "Lead Time"
                           WRITELINE CTm, "TC"

*****
*                               Locations                             *
*****

```

Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
Caixa_Eixo	1	1	Time Series	Oldest, ,	
E1	1	1	Time Series	Oldest, ,	
E2	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Suporte	1	1	Time Series	Oldest, ,	
E3	1	1	Time Series	Oldest, ,	
E4	1	1	Time Series	Oldest, ,	
E5	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_1A	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_1B	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_1C	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_1D	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_2A	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_2B	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_2C	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_3A	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_3B	1	1	Time Series	Oldest, ,	
P_3C	1	1	Time Series	Oldest, ,	

\*\*\*\*\*

Entities			
Name	Speed (mpm)	Stats	Cost
Eixo	50	Time Series	
Junta	50	Time Series	
Operador_2	50	Time Series	
Operador_3	50	Time Series	

\*\*\*\*\*

Processing							
Process	Location	Operation	Routing	Blk	Output	Destination Rule	Move Logic
Operador_2	P_1A	ORDER 1 Eixo TO Caixa_Eixo LOAD 1 IFF Processo = 0 GRAPHIC 3 WAIT mOplAt1 SEC WAIT UNTIL vEquipamento1=0 UNLOAD 1 IFF Processo = 0 GRAPHIC 2		1	Operador_2 P_2A	FIRST 1	MOVE FOR
mOplMov1*.55/.9 SEC							
Eixo	Caixa_Eixo	Processo = 0 Start = CLOCK()		1	Eixo P_1A	LOAD 1	
Eixo	P_1A			1	Eixo E1	FIRST 1	
Eixo	E1	vEquipamento1 = 1 WAIT 12.18 SEC Processo = 1		1	Eixo P_1D	LOAD 1	vEquipamento1 = 0
Operador_3	P_1B	GRAPHIC 1 LOAD 1 IFF Processo = 3 GRAPHIC 4 WAIT UNTIL vComponenteE3 = 1 vComponenteE3 = 0		1	Operador_3 P_1C	FIRST 1	MOVE FOR
mOplMov2 SEC							
Eixo	Suporte	vSuporte = 1 Processo = 3		1	Eixo P_1B	LOAD 1	vSuporte = 0
Operador_3	P_1C	WAIT mOplAt2 SEC UNLOAD 1 IFF Processo = 3 GRAPHIC 1		1	Operador_3 P_3A	FIRST 1	MOVE FOR
mOpl2Mov1*0.9 SEC #0.9 pois é sem carga							
Eixo	P_1C	JOIN 1 Junta		1	Eixo E4	FIRST 1	
Eixo	E4	WAIT 35.02 SEC Processo = 4		1	Eixo P_2B	LOAD 1	
Operador_3	P_1D	LOAD 1 IFF Processo = 1 GRAPHIC 3 WAIT UNTIL vEquipamento2 = 0 WAIT mOplAt3 SEC					

```

UNLOAD 1 IFF Processo = 1
GRAPHIC 1 1 Operador_3 P_1B FIRST 1 MOVE FOR
mOp1Mov1*.35/.9 SEC #acrescentado
Eixo P_1D 1 Eixo E2 FIRST 1
Eixo E2 vEquipamento2 = 1
WAIT 11.04 SEC
Processo = 2 1 Eixo P_2A LOAD 1 vEquipamento2
= 0
Operador_2 P_2A WAIT mOp2At3 SEC
LOAD 1 IFF Processo = 2
GRAPHIC 3
WAIT UNTIL vSuporte = 0
UNLOAD 1 IFF Processo = 2
GRAPHIC 2 1 Operador_2 P_2B FIRST 1 MOVE FOR
mOp2Mov3 SEC
Eixo P_2A 1 Eixo Suporte FIRST 1
Operador_2 P_2B GRAPHIC 2
LOAD 1 IFF ENTITY() = 2
LOAD 1 IFF ENTITY() = 1 AND Processo = 4
GRAPHIC 4
WAIT mOp2At1 SEC
UNLOAD 1 IFF ENTITY() = 2
1 Operador_2 P_2C FIRST 1 MOVE FOR
mOp2Mov1 SEC
Junta E3 WAIT 32.82 SEC 1 Junta P_2B LOAD 1 ORDER 1 Junta
TO E3
Junta P_2B 1 Junta E4 FIRST 1
Junta E4 vComponenteE3 = 1
1 Junta P_1C JOIN 1
Operador_2 P_2C WAIT UNTIL vEquipamento5 = 0
WAIT mOp2At2 SEC
UNLOAD 1 IFF Processo = 4
GRAPHIC 1 1* Operador_2 P_1A FIRST 1 MOVE FOR
mOp2Mov2*2.4/1.7 SEC
2 Operador_2 EXIT FIRST 1
Eixo P_2C 1 Eixo E5 FIRST 1
Eixo E5 vEquipamento5 = 1
GRAPHIC 2
WAIT 4.88 SEC
Processo = 5 1 Eixo P_3A LOAD 1 vEquipamento5
= 0
Operador_3 P_3A LOAD 1 IFF Processo = 5
WAIT mOp3At1 SEC
GRAPHIC 2
1 Operador_3 P_3B FIRST 1 MOVE FOR
mOp3Mov1 SEC
Operador_3 P_3B WAIT mOp3At2 SEC
1 Operador_3 P_3C FIRST 1
Operador_3 P_3C UNLOAD 1 IFF Processo = 5
GRAPHIC 1 1* Operador_3 P_1D FIRST 1 MOVE FOR
mOp3Mov2*1.3/1.6 SEC
2 Operador_3 EXIT FIRST 1
Eixo P_3C vLead_Time = CLOCK() - Start
vTC = CLOCK() - vLastObservation
vLastObservation = CLOCK()
WRITE CTm, vLead_Time
WRITELINE CTm, vTC
1 Eixo EXIT FIRST 1

```

```

*****
* Arrivals *
*****
Entity Location Qty each First Time Occurrences Frequency Logic
-----
Eixo E2 1 0 1 1 1
Junta E3 1 0 1 1 1
Eixo E4 1 0 1 1 1
Eixo E5 1 0 1 1 1
Operador_2 P_1A 1 0 1 1 1
Operador_3 P_3A 1 0 1 1 1
*****
* Attributes *

```

```

*****
ID          Type          Classification
-----
#Estagio de processamento
Processo    Integer          Entity
#Entrada da entidade na célula
Start      Real              Entity

*****
*                               Variables (global)                               *
*****
ID          Type          Initial value Stats
-----
vTC         Real          0              Time Series
vLead_Time  Real          0              Time Series
vLastObservation Real      0              Time Series
vComponenteE3 Integer    0              Time Series
vEquipamento1 Integer    0              Time Series
vEquipamento2 Integer    0              Time Series
vEquipamento5 Integer    0              Time Series
vSuporte    Integer    0              Time Series

*****
*                               Macros                               *
*****
ID          Text
-----
Stream      #4 #Warmup
            5 #Resultados
mOp1At1     #18.8
            14.8502+IG(8.64161, 3.92327, Stream)
mOp1Mov1    #5.5
            0.64218+4.24695*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./3.47914)
mOp1Mov2    #2.3
            -16.9618+P5(1417.26, 27207, Stream)
mOp1At2     #3.7
            -16.9481+W(36.822, 20.9509, Stream)
mOp1Mov3    #3.2
            0.778122+IG(22.9898, 2.37113, Stream)
mOp1At3     #12.5
            10.1924+IG(5.35296, 2.32559, Stream)
mOp2At1     #6.7
            -3.43311+P5(78.9753, 788.741, Stream)
mOp2Mov1    #5.3
            2.81887+W(1.36236, 2.71852, Stream)
mOp2At2     #17.8
            4.73239+12.6693*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./7.34274)
mOp2Mov2    #4.1
            2.16852+W(2.65164, 2.13613, Stream)
mOp2At3     #16.1
            3.15565+12.4973*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./7.06432)
mOp2Mov3    #1.9
            0.23562+1.4711*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./3.98185)
mOp3At1     #6.1
            T(2.31647, 4.37773, 11.6635, Stream)
mOp3Mov1    #3.2
            1.56+1.02361*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./1.96861)
mOp3At2     #37.9
            24.9804+P5(8.04306, 90.9776, Stream)
mOp3Mov2    #4.9
            2.74+1.68098*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))* (1./2.63063)

*****
*                               External Files                               *
*****
ID          Type          File Name          Prompt
-----
CTm         General Write    C:\...\Arquivo_Warmup.txt

```

**APÊNDICE B – Caso 2**

## B.1 Dados coletados para o operador 1: Caso 2

	Op1Mov1	Op1At1	Op1Mov2	Op1At2	Op1Mov3	Op1At3	Op1At4	Op1Mov4	Op1Ins1	Op1Mov5	Op1Ins2	Op1Ins3
1	1,32	4,05	2,55	4,60	2,95	3,43	1,43	3,62	14,26	2,21	25,90	11,51
2	1,76	3,65	3,2	4,63	2,86	5,32	2,57	4,16	7,87	1,46	4,22	18,61
3	1,82	3,19	2,58	4,75	2,96	3,06	7,07	4,70	7,29	1,62	34,28	10,12
4	2,22	6,17	3,46	4,47	2,49	3,72	2,07	3,93	7,15	1,00	21,51	10,46
5	1,89	4,24	4,07	3,15	2,58	3,52	1,18	4,05	6,28	1,64	17,75	10,61
6	1,30	3,94	2,65	4,73	2,62	3,94	1,49	2,58	13,67	1,39	7,43	10,79
7	3,43	4,40	4,42	3,60	3,02	3,00	1,1	2,49	4,97	4,16	11,14	12,00
8	2,39	4,84	3,03	5,10	2,85	2,37	0,92	3,79	5,73	2,06	12,81	20,97
9	1,88	4,62	3,22	4,04	4,59	4,25	1,71	3,17	4,77	2,04	12,19	4,76
10	5,71	3,40	2,85	7,24	5,33	4,57	1,39	3,24	6,65	2,74	7,91	12,14
11	2,10	3,81	4,37	4,68	1,95	3,43	0,98	2,34	6,79	1,63	12,92	25,69
12	0,72	2,40	3,15	2,89	1,67	4,73	3,86	3,52	10,62	2,69	5,53	14,22
13	1,61	5,04	2,22	4,54	2,18	3,39	0,69	2,84	6,24	1,92	12,44	8,10
14	2,34	3,64	2,23	3,69	2,41	3,30	1,99	2,84	11,44	1,25	22,77	2,96
15	0,64	1,91	2,54	3,85	2,45	6,45	1,48	3,88	6,33	1,50	24,15	3,33
16	1,70	3,75	3,05	3,49	2,84	3,04	6,59	3,14	8,01	1,16	4,47	5,98
17	3,81	3,69	3,00	4,65	2,89	3,96	5,61	3,92	6,59	1,66	5,60	18,92
18	3,12	4,80	3,97	3,21	2,37	3,47	1,95	3,22	8,44	1,38	8,00	10,63
19	1,88	3,65	2,77	4,41	2,46	5,06	3,34	2,81	5,78	1,74	11,75	18,92
20	1,38	3,49	2,59	4,15	2,25	3,78	4,41	3,20	5,70	2,24	6,98	14,97
21	1,21	3,82	2,46	3,81	3,12	2,90	2,92	3,12	6,89	2,57	4,98	17,76
22	2,37	2,23	2,66	3,93	2,01	3,10	11,79	4,28	6,49	1,48	6,36	4,56
23	4,28	3,30	2,25	4,84	2,27	9,94	1,25	4,17	10,50	1,48	17,65	12,51
24	0,69	3,08	3,16	4,56	2,29	3,38	2,4	3,53	9,80	1,90	12,80	15,35
25	0,95	4,54	2,77	4,33	2,38	3,81	4,04	3,09	6,91	1,62	31,03	10,60
26	1,73	3,87	2,88	2,95	2,90	6,44	3,26	2,39	6,33	2,56	8,24	8,32
27	1,59	6,84	2,47	4,42	2,45	3,93	1,67	2,42	9,86	2,42	11,47	13,95
28	1,11	4,64	3,40	4,84	2,26	3,53	3,93	3,18	6,17	1,43	14,09	14,85
29	1,30	3,82	2,16	4,35	3,02	3,49	2,13	3,18	7,09	2,07	11,75	14,97
30	1,20	3,69	2,55	2,92	1,95	3,87	1,92	3,29	6,81	3,16	14,60	14,15
31	0,76	3,94	2,09	3,84	2,53	3,37	2,04	4,47	7,18	1,76	6,92	11,56
32	1,53	3,33	2,39	4,00	1,79	3,81	3,77	2,38	4,80	1,94	6,48	11,64
33	1,45	4,03	3,10	3,89	1,67	4,13	0,84	2,71	8,84	1,51	12,97	19,40
34	1,01	3,62	2,88	4,31	1,93	3,52	0,76	2,80	7,69	1,57	9,94	9,62
35	1,49	4,03	3,05	2,76	2,52	3,88	3,65	2,58	9,09	1,77	10,47	15,89
36	1,29	3,65	2,95	2,72	2,18	4,49	1,28	3,18	6,79	1,94	10,19	11,75
37	1,67	3,30	2,96	4,33	3,33	4,19	3,85	2,49	9,44	2,36	9,54	16,96
38	1,25	3,98	3,78	4,63	2,26	3,54	1,96	3,04	6,10	1,68	5,95	15,11
39	2,40	4,04	3,02	3,72	2,06	3,97	4,83	2,92	8,69	1,98	5,72	23,83
40	3,36	3,92	3,06	1,92	1,88	3,56	1,01	2,94	5,12	2,67	5,57	10,79
41	1,99	3,78	2,89	4,08	3,04	4,13	1,12	2,86	7,31	1,85	12,40	10,59
42	1,97	4,87	2,77	3,50	2,14	5,14	2,03	4,92	7,51	1,73	10,07	18,01
43	2,36	2,57	2,87	4,64	2,33	4,21	3,51	2,89	5,16	1,79	8,68	15,72
44	2,07	3,47	2,19	4,06	2,48	3,62	4,73	3,05	8,77	1,18	6,19	12,60
45	1,52	3,43	2,51	3,49	2,30	3,31	3,02	2,94	5,49	1,45	8,45	21,66
46	1,03	4,00	2,69	4,03	2,55	3,38	5,97	2,84	9,01	1,33	9,76	14,20
47	1,33	3,93	2,47	4,91	2,27	3,53	2,42	2,05	4,88	1,80	10,67	13,70
48	1,73	3,29	2,47	3,85	3,64	5,45	1,44	3,46	4,40	2,30	5,78	15,13
49	1,66	5,19	1,99	4,47	2,87	3,16	1,37	3,52	7,95	1,23	18,60	10,34
50	1,10	3,28	2,98	4,08	1,95	3,22	2,13	3,04	6,44	1,89	9,39	14,39

*Continuação*

	<b>Op1Mov1</b>	<b>Op1At1</b>	<b>Op1Mov2</b>	<b>Op1At2</b>	<b>Op1Mov3</b>	<b>Op1At3</b>	<b>Op1At4</b>	<b>Op1Mov4</b>	<b>Op1Ins1</b>	<b>Op1Mov5</b>	<b>Op1Ins2</b>	<b>Op1Ins3</b>
51	1,75	3,54	2,65	3,96	2,51	2,92	1,44	3,56	10,10	0,92	16,21	11,61
52	1,02	3,53	3,58	5,10	1,93	2,40	2,86	4,34	6,77	0,85	6,45	11,42
53	2,36	3,90	2,90	4,92	2,07	4,47	2,08	3,15	7,85	1,00	15,63	12,88
54	1,39	2,42	2,95	2,33	2,22	5,36	2,23	2,86	6,74	1,86	10,27	9,85
55	1,61	6,48	3,22	4,24	3,12	3,52	0,67	3,25	5,51	1,39	9,35	12,76
56	1,86	4,12	3,07	4,64	2,33	4,36	2,3	2,53	6,20	1,35	16,53	10,83
57	1,69	3,57	2,27	4,63	2,21	4,66	1,19	3,02	9,62	1,98	8,36	13,63
58	1,97	5,24	1,89	1,95	2,02	3,81	2,44	2,64	6,08	1,92	9,48	16,59
59	1,33	3,37	1,94	4,24	2,43	4,20	3,76	3,24	7,33	0,94	12,25	10,26
60	0,91	5,16	2,44	3,64	2,74	3,96	1,19	2,39	5,80	1,89	9,91	15,21
61	2,08	4,66	2,30	3,65	2,62	9,87	1,97	5,53	6,35	1,10	5,48	14,27
62	1,74	1,71	3,43	3,96	2,02	7,88	1,69	2,48	4,97	0,82	7,05	13,07
63	2,96	3,68	2,89	4,43	2,08	5,30	1,79	2,26	9,73	1,57	8,15	14,76
64	2,89	3,64	2,73	4,42	2,52	3,48	1,76	2,94	7,90	1,45	11,84	9,92
65	1,83	3,94	3,06	3,93	2,88	3,80	1,77	3,20	4,96	1,83	10,02	14,69

## B.2 Dados coletados para o operador 2: Caso 2

	Op2At1	Op2At2	Op2At3	Op2At4	Op2At5	Op2Mov1	Op2At6	Op2At7	Op2Mov2
1	4,00	7,89	9,31	2,85	21,45	3,88	4,10	12,67	2,12
2	3,09	6,90	4,40	2,91	20,21	2,05	4,35	10,89	2,08
3	2,83	8,01	9,76	2,18	17,33	3,07	3,83	10,71	1,81
4	3,25	9,79	6,52	3,28	20,27	1,84	2,50	12,04	1,24
5	2,28	9,58	10,45	3,37	26,66	2,08	3,75	13,36	2,72
6	3,37	8,67	6,89	2,72	20,22	1,80	2,91	12,25	1,99
7	1,48	10,38	8,15	2,55	17,93	2,90	2,96	13,26	2,81
8	3,82	7,76	8,67	2,81	16,29	1,93	3,32	15,64	2,85
9	3,87	8,25	10,64	2,85	19,86	1,57	1,86	15,45	1,20
10	1,31	8,40	8,12	2,27	16,70	2,47	3,82	15,63	2,21
11	5,33	8,41	12,25	3,50	16,45	2,72	2,08	14,72	1,29
12	2,17	9,46	7,75	2,68	16,04	2,80	2,63	15,51	1,55
13	2,97	7,83	20,64	3,19	16,60	2,71	3,63	17,66	1,89
14	2,92	6,97	10,07	2,87	15,51	2,21	3,59	13,58	2,58
15	1,19	9,80	9,04	2,94	20,03	1,99	3,78	9,75	1,07
16	2,95	9,60	8,29	4,19	18,38	1,64	2,85	12,72	1,62
17	2,24	7,87	10,14	4,57	22,04	2,28	2,08	14,49	1,99
18	2,52	10,16	10,31	2,91	15,60	1,90	2,03	13,86	1,98
19	1,43	6,33	9,70	2,87	16,54	2,03	2,63	15,18	1,49
20	2,07	6,48	6,20	3,15	18,19	1,95	2,91	13,42	1,52
21	2,93	8,13	8,60	3,91		2,77	3,56		2,43
22	1,06	8,32	7,93	2,36		2,02	2,85		1,89
23	1,77	6,62	8,94	2,93		1,80	2,63		3,07
24	3,66	8,84	6,68	2,59		1,65	3,80		2,62
25	1,20	5,73	7,16	3,23		3,80	3,28		2,53
26	1,62	9,76	4,72	2,33		3,53	4,11		2,85
27	3,60	9,12	9,17	2,33		4,39	2,05		3,40
28	2,73	8,15	7,49	2,55		2,58	2,18		0,75
29	1,83	7,40	8,03	1,90		1,76	3,00		2,81
30	2,36	7,68	9,00	3,19		1,54	3,51		1,90
31	1,29	7,71	5,38	2,59		1,99	2,08		1,54
32	2,62	9,54	8,95	2,96		1,65	4,19		0,92
33	2,80	7,43	5,33	3,37		1,57	2,59		1,73
34	5,05	9,26	9,26	2,99		2,30	2,63		2,12
35	2,34	9,23	7,56	2,20		1,84	2,09		1,52
36	1,25	7,39	5,92	2,46		2,40	3,56		2,06
37	1,61	7,59	8,09	2,50		2,72	4,42		2,08
38	1,43	7,02	6,26	2,91		1,07	1,62		1,35
39	3,43	10,65	6,98	2,31		1,89	1,40		1,26
40	2,54	10,14	6,04	3,04		1,57	2,94		1,57
41	1,29	7,25	12,55	2,81		1,99	2,84		2,96
42	1,86	9,89	9,19	2,36		2,12	2,74		1,74
43	1,51	7,95	12,15	3,15		1,84	3,38		1,79
44	2,77	6,25	4,01	3,18		2,41	3,20		2,02
45	3,22	5,61	3,62	2,88		2,02	3,06		1,71

	<b>Op2Ins1</b>	<b>Op2Ins2</b>	<b>Op2Ins3</b>	<b>Op2At8</b>	<b>Op2At9</b>	<b>Op2At10</b>	<b>Op2At11</b>
1	5,79	27,16	20,21	27,22	62,82	18,57	17,56
2	6,63	46,27	35,44	29,68	49,71	25,11	19,79
3	5,01	25,51	33,61	20,03	50,00	18,92	19,16
4	4,87	35,80	19,21	22,40	56,09	15,22	18,20
5	3,38	28,73	32,82	22,17	31,23	14,77	14,08
6	5,72	36,13	36,59	23,50	56,15	16,24	17,65
7	3,88	25,64	23,14	23,55	44,14	28,77	16,38
8	11,00	37,19	34,65	22,19	53,11	14,72	16,79
9	7,67	29,82	33,18	22,14	52,61	13,54	21,13
10	7,05	27,12	22,61	21,69	48,89	17,52	17,11
11	7,28	32,18	30,47	20,49	42,00	13,21	16,70
12	6,13	30,94	32,77	22,14	51,01	14,44	13,17
13	5,45	24,41	28,16	21,48	54,56	17,66	16,29
14	6,16	29,60	34,01	19,07	43,57	15,42	18,12
15	5,16	26,82	32,99	33,32	48,04	16,46	17,46

## B.3 Dados coletados para o operador 3: Caso 2

	Op3At1	Op3At2	Op3Mov1	Op3At3	Op3Mov2	Op3At4	Op3Mov3	Op3Ins1	Op3Ins2	Op3Ins3
1	1,55	4,31	2,36	5,70	3,50	4,21	9,79	7,62	5,98	4,79
2	2,06	5,28	2,14	4,47	2,60	4,46	1,03	10,42	11,93	9,48
3	1,94	3,52	2,25	4,96	2,24	3,94	5,80	7,12	14,42	4,80
4	1,59	3,33	3,28	6,02	2,77	4,03	3,04	10,06	5,71	6,03
5	1,46	4,16	2,45	5,36	5,73	4,45	7,84	11,21	8,85	5,10
6	1,23	4,25	1,86	5,36	3,47	3,85	2,76	15,02	11,64	7,76
7	0,77	3,52	1,99	5,87	2,73	4,24	4,62	14,27	9,36	7,11
8	0,97	3,58	1,93	6,19	3,77	2,92	4,54	15,13	9,11	5,03
9	1,02	3,84	1,88	5,68	1,71	4,16	4,26	15,83	7,09	6,64
10	1,82	5,63	2,16	5,87	2,83	4,28	2,00	16,72	8,04	6,03
11	1,77	2,36	3,14	14,07	4,01	3,34	0,91	5,09	6,58	6,15
12	0,78	4,28	2,11	5,19	3,08	3,81	2,38	13,91	9,73	9,00
13	0,92	5,77	1,85	5,47	2,46	4,46	4,46	13,37	7,96	6,30
14	2,11	3,94	2,74	5,06	2,70	4,33	3,45	14,52	7,15	6,36
15	1,95	5,35	3,53	6,36	2,29	5,19	3,70	13,38	6,81	6,55
16	1,86	5,69	2,02	5,73	2,50	3,49	3,59	15,63	14,50	3,37
17	2,93	4,41	2,20	5,79	2,18	4,58	4,04	15,62	7,36	3,71
18	1,48	2,99	2,58	5,28	3,34	4,29	1,88	18,29	8,59	4,60
19	3,93	4,09	2,06	5,41	2,77	5,48	5,93	17,33	6,08	7,87
20	1,07	3,57	6,23	4,98	2,02	4,33	2,24	11,88	11,90	7,65
21	1,83	4,21	2,00	5,17	3,49	3,48	4,51	6,09	9,38	5,51
22	1,25	3,72	2,22	5,14	2,84	4,18	4,24	5,09	9,80	9,03
23	1,70	4,16	2,77	4,85	3,66	5,66	2,56	5,31	9,01	6,05
24	12,56	5,17	1,42	5,89	2,61	4,12	9,90	3,88	9,50	7,28
25	2,66	3,29	2,14	5,64	2,11	4,53	7,07	4,85	17,66	6,40
26	1,04	3,50	2,66	4,95	2,50	4,46	8,47	4,56	7,30	6,87
27	1,95	3,53	1,33	5,54	3,16	4,86	7,89	7,13	7,93	6,43
28	5,32	3,54	3,40	5,30	2,49	4,47	4,36	6,80	12,98	2,27
29	1,69	3,27	2,30	5,30	2,92	4,65	1,35	9,23	6,20	7,12
30	4,84	3,68	2,50	6,29	1,48	4,28	1,37	8,53	6,04	8,61
31	2,05	4,70	1,92	7,69	1,10	3,52	1,51	5,39	10,50	5,54
32	0,86	3,02	2,66	6,37	2,34	3,72	1,58	6,80	8,19	6,88
33	2,93	2,18	1,82	6,84	1,77	3,86	2,22	10,77	7,24	6,76
34	1,00	3,93	2,08	5,91	3,89	3,59	2,90	11,15	8,17	2,37
35	1,38	3,93	2,06	4,58	2,16	5,00	1,52	9,35	6,32	6,98
36	0,74	4,30	2,26	5,28	2,58	5,16	4,42	10,71	9,51	7,07
37	1,85	3,52	1,77	5,58	2,73	4,20	2,02	6,89	6,85	7,57
38	4,00	4,34	2,44	2,33	2,95	4,67	1,32	12,79	7,87	6,17
39	4,69	2,06	3,40	3,49	1,67	4,69	3,92	7,72	9,62	2,65
40	3,17	3,40	2,21	4,81	3,90	4,00	1,79	6,96	7,09	5,17
41	3,61	3,72	2,14	5,33	3,53	4,68	7,03	5,51	6,73	1,42
42	2,94	3,22	2,46	5,29	2,61	4,57	1,25	14,59	13,16	4,25
43	2,56	4,57	2,02	5,07	2,46	4,45	1,23	5,87	11,34	4,97
44	3,00	3,52	2,08	6,64	2,89	3,74	2,68	7,59	7,91	2,20
45	2,68	4,19	2,32	6,91	3,13	4,46	1,09	8,34	11,03	5,04
46	3,30	3,22	1,98	5,82	2,12	4,65	0,91	10,02	11,20	4,91
47	1,74	3,62	1,64	6,01	2,87	4,13	1,35	8,08	8,69	5,69
48	2,86	4,89	2,32	5,57	2,76	6,31	1,77	7,09	8,77	5,00
49	1,51	3,88	2,29	5,33	2,59	4,03	1,03	6,01	7,95	6,76
50	3,43	3,21	2,04	5,58	2,73	4,00	2,27	10,11	9,63	5,28

## Continuação

	Op3At1	Op3At2	Op3Mov1	Op3At3	Op3Mov2	Op3At4	Op3Mov3	Op3Ins1	Op3Ins2	Op3Ins3
51	2,85	4,35	2,48	4,32	2,14	4,81	4,22	6,44	8,87	3,15
52	3,50	2,77	2,53	4,89	3,20	3,78	1,98	6,77	8,65	6,95
53	0,98	1,71	2,21	5,17	2,43	4,30	1,53	9,44	6,67	6,05
54	3,74	3,24	2,33	5,19	2,30	4,69	1,86	11,75	10,26	4,28
55	2,18	2,05	1,94	5,61	3,63	3,89	1,22	6,87	10,26	5,07
56	1,17	2,97	3,28	5,77	2,40	4,52	1,42	5,82	6,77	5,14
57	1,13	4,70	2,30	6,09	1,69	3,85	0,46	10,30	9,94	10,64
58	3,01	2,01	1,82	6,40	2,13	4,48	0,54	7,95	6,68	9,28
59	1,20	3,04	3,49	4,18	2,51	4,12	1,58	3,88	7,37	6,47
60	4,25	3,54	2,01	4,69	3,02	4,08	1,42	7,16	7,69	5,93
61	1,69	3,80	2,77	4,68	2,26	3,87	4,48	4,74	5,23	5,67
62	2,16	2,39	2,28	4,75	1,80	4,74	1,43	4,65	9,19	10,10
63	2,54	2,46	5,73	5,16	2,14	2,78	2,48	6,01	6,57	6,47
64	4,22	3,30	2,17	6,14	2,68	3,94	1,55	11,77	9,54	6,14
65	3,38	2,93	1,80	5,38	2,37	4,10	2,64	7,39	8,11	6,54

## B.4 Dados coletados para os equipamentos: Caso 2

	E1	E2	E3	E4	E6	E7	E8
1	43,45	50,62	45,26	15,64	49,93	46,83	20,49
2	43,30	50,53	45,32	15,45	49,95	46,68	20,34
3	42,85	50,68	45,23	16,93	49,81	46,51	19,86
4	42,86	50,75	45,28	15,97	49,76	46,68	18,51
5	42,94	50,58	45,28	16,92	50,02	46,42	19,80

## B.5 Dados coletados para a troca de inserto: Caso 2

	Sem Ajuste	Com Ajuste
1	109,46	331,49
2	97,39	319,39
3	93,32	311,97
4	98,58	310,17
5	111,98	318,23
6	93,91	327,66
7	105,07	343,35
8	128,27	388,26
9	104,39	324,69
10	95,47	398,36

## B.6 Desenvolvimento do modelo computacional: Caso 2

A construção do modelo computacional do caso 2 seguiu a mesma lógica do caso 1. Os operadores foram modelados como entidades, decorrente do processo de análise das opções de programação descrito no Apêndice A.5. A partir deste ponto, a construção do modelo foi dividida em duas grandes etapas. Primeiramente foram construídos modelos com





```

        WAIT mTroca_SEM_ajuste SEC
        GRAPHIC 1
    }ELSE
    { INC sTrocaInserto[2,1]
    }

#Troca inserto 2B
IF sTrocaInserto[3,1] >= sTrocaInserto[3,2] THEN
{ sTrocaInserto[3,1] = 1
  sTrocaInserto[3,2] = 110 + U(20, 20, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[3,1]
}

UNLOAD 1 IFF Processo = 1

#Inspeção do E2
IF sInspecao[2,1] >= sInspecao[2,2] THEN
{ sInspecao[2,1] = 1
  sInspecao[2,2] = 3 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  ROUTE 2
}ELSE
{ INC sInspecao[2,1]
  ROUTE 1
}
}
1   Operador_1 Loc3a   FIRST 1 #Deslocamento
para próximo posto sem inspeção
MOVE FOR

mOp1_Mov2 SEC
2   Operador_1 Loc4a   FIRST 1 #Deslocamento
para a inspeção
MOVE FOR

mOp1_Mov4 SEC
Esquerda Loc2a 1 Esquerda E2 FIRST 1
Esquerda E2 WAIT 50.63 SEC
Processo = 2 1 Esquerda Loc2a LOAD 1
Operador_1 Loc4a WAIT mOp1_Ins1 SEC
GRAPHIC 1 1 Operador_1 Loc3a FIRST 1 MOVE FOR
mOp1_Mov5 SEC
Operador_1 Loc3a LOAD 1 IFF Processo = 3
WAIT mOp1_At2 SEC

#Troca inserto 3A
IF sTrocaInserto[4,1] >= sTrocaInserto[4,2] THEN
{ sTrocaInserto[4,1] = 1
  sTrocaInserto[4,2] = 125 + U(15, 15, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[4,1]
}

UNLOAD 1 IFF Processo = 2
1   Operador_1 Loc4a   FIRST 1 MOVE FOR
mOp1_Mov3 SEC
Esquerda Loc3a 1 Esquerda E3 FIRST 1
Esquerda E3 WAIT 45.28 SEC
Processo = 3 1 Esquerda Loc3a LOAD 1
Operador_1 Loc4a #Inspeção do E3
IF sInspecao[3,1] >= sInspecao[3,2] THEN
{ sInspecao[3,1] = 1
  sInspecao[3,2] = 5 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  WAIT mOp1_Ins2 SEC #inspeção
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sInspecao[3,1]
}
LOAD 1 IFF Processo = 4
WAIT mOp1_At3 SEC #E4
UNLOAD 1 IFF Processo = 3
1   Operador_1 Loc4b   FIRST 1

```

Esquerda	Loc4a		1	Esquerda	E4	FIRST	1
Esquerda	E4	WAIT 16.18 SEC					
		Processo = 4	1	Esquerda	Loc4a	LOAD	1
Operador_1	Loc4b	#Inspeção do E4 IF sInspecao[4,1] >= sInspecao[4,2] THEN { sInspecao[4,1] = 1 sInspecao[4,2] = 13 + distInspecao(Stream) GRAPHIC 2 WAIT mOp1_Ins3 SEC #inspeção + larga pç GRAPHIC 1 }ELSE { INC sInspecao[4,1] WAIT mOp1_At4 SEC #larga pç sem inspeção }					
		UNLOAD 1 IFF Processo = 4					
			1	Operador_1	EXIT	FIRST	1
			2*	Operador_1	Loc4c	FIRST	1
Operador_1	Loc4c	LOAD 1 IFF Processo = 1	1	Operador_1	Loc2a	FIRST	1
						MOVE FOR	
mOp1_Mov1	SEC						
Esquerda	Loc4b		1	Esquerda	C2	FIRST	1
Esquerda	C1	MOVE FOR 0 vC1 = CONTENTS(C1)					
			1	Esquerda	Loc4c	LOAD	1
						vC1 =	
CONTENTS(C1)							
Esquerda	C2	MOVE FOR 0	1	Esquerda	Loc1c	LOAD	1
Operador_2	Loc1a	ORDER 1 Esquerda TO Forjado ORDER 1 Direita TO Forjado LOAD 2 IFF Processo = 0 WAIT mOp2_At1 SEC #pega peça LOAD 2 IFF Processo = 1 WAIT mOp2_At2 SEC #descarga carga  #Troca inserto 1A IF sTrocaInserto[1,1] >= sTrocaInserto[1,2] THEN { sTrocaInserto[1,1] = 1 sTrocaInserto[1,2] = 335 + U(20, 20, Stream) GRAPHIC 3 WAIT mTroca_COM_ajuste SEC GRAPHIC 1 }ELSE { INC sTrocaInserto[1,1] }					
		UNLOAD 2 IFF Processo = 0					
		WAIT mOp2_At3 SEC #insp 100% + larga pç					
		#Inspeção de E1 IF sInspecao[1,1] >= sInspecao[1,2] THEN { sInspecao[1,1] = 1 sInspecao[1,2] = 29 + distInspecao(Stream) GRAPHIC 2 WAIT mOp2_Ins1 SEC GRAPHIC 1 }ELSE { INC sInspecao[1,1] }					
			1	Operador_2	Loc1b	FIRST	1
Esquerda	Forjado	Processo = 0	1	Esquerda	Loc1a	LOAD	1
Esquerda	Loc1a		1	Esquerda	E1	FIRST	1
Esquerda	E1	LOAD 1 IFF Processo = 0 AND ENTITY() = 2 WAIT 43.08 SEC UNLOAD 1 IFF Processo = 0 AND ENTITY() = 2 Processo = 1					
			1	Esquerda	Loc1a	LOAD	1
Direita	Forjado	Processo = 0	1	Direita	Loc1a	LOAD	1
Direita	Loc1a		1	Direita	E1	LOAD	1
Direita	E1	Processo = 1	1	Direita	Loc1a	LOAD	1
Operador_2	Loc1b	WAIT UNTIL ((vC1<20) AND (vC3<20)) UNLOAD 2 IFF Processo = 1					
			1	Operador_2	Loc1c	FIRST	1
Esquerda	Loc1b		1	Esquerda	C1	FIRST	1
Direita	Loc1b		1	Direita	C3	FIRST	1

---

```

Operador_2 Loc1c #Lógica de escolha do lado a ser trabalhado

IF (CONTENTS(C2) >= 2) AND (CONTENTS(C4) >= 2) THEN
{
  IF vLado = 0 THEN #vai para E5
  { LOAD 2 IFF Processo = 4
    WAIT mOp2_At4 SEC
    vLado = 1
    ROUTE 1
  }ELSE #vai para E9
  { LOAD 2 IFF Processo = 8
    WAIT mOp2_At6 SEC #pega pç + mov
    vLado = 0
    ROUTE 2
  }
}
ELSE
{ IF (CONTENTS(C2) >= 2) THEN
  { LOAD 2 IFF Processo = 4
    WAIT mOp2_At4 SEC #pega pç + mov
    vLado = 1
    ROUTE 1
  }
  ELSE
  { IF (CONTENTS(C4) >= 2) THEN
    { LOAD 2 IFF Processo = 8
      WAIT mOp2_At6 SEC #pega pç + mov
      vLado = 0
      ROUTE 2
    }
    ELSE
    {ROUTE 3
    }
  }
}
}

```

	1	Operador_2 Loc5a	FIRST 1
	2	Operador_2 Loc9a	FIRST 1
	3	Operador_2 Loc1a	FIRST 1

---

```

Operador_2 Loc5a IF Itens_E5 = 2 OR Itens_E5 = 1 THEN
{
  #Lamina
  WAIT mOp2_At5 SEC
  UNLOAD 2 IFF Processo = 4
  INC Itens_E5, 2
  IF Itens_E5 = 3 AND Caixa_E5 = 45 THEN
  {#Preenche o cartão
    WAIT mOp2_At9 SEC
  }
}ELSE
{ IF Itens_E5 = 3 OR Itens_E5 = 4 THEN
  {#Lamina e coloca na caixa
    WAIT mOp2_At8 SEC
    UNLOAD 2 IFF Processo = 4
    INC Itens_E5, 2
    DEC Itens_E5, 5
    INC Caixa_E5, 5
    IF Itens_E5 = 0 AND Caixa_E5 = 50 THEN
    {#Libera lote
      WAIT mOp2_At10 SEC
      DEC Caixa_E5, 50
    }
  }ELSE
  {#Inspeção E5 (Lamina e mede)
    IF sInspecao[5,1] >= sInspecao[5,2] THEN
    {sInspecao[5,1] = 1
      sInspecao[5,2] = 1 + distInspecao(Stream) #cada passagem vale 10 pç
      GRAPHIC 2
      WAIT mOp2_Ins2 SEC
      GRAPHIC 1
      UNLOAD 2 IFF Processo = 4
      INC Itens_E5, 2
    }ELSE
    {
      WAIT mOp2_At5 SEC #Só lamina as peças
    }
  }
}

```



```

#Troca inserto 6A
IF sTrocaInserto[5,1] >= sTrocaInserto[5,2] THEN
{ sTrocaInserto[5,1] = 1
  sTrocaInserto[5,2] = 130 + U(10, 10, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_SEM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[5,1]
}

#Troca inserto 6B
IF sTrocaInserto[6,1] >= sTrocaInserto[6,2] THEN
{ sTrocaInserto[6,1] = 1
  sTrocaInserto[6,2] = 160 + U(20, 20, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[6,1]
}

UNLOAD 1 IFF Processo = 1
1 Operador_3 Loc7a FIRST 1 MOVE FOR
mOp3_Mov1 SEC
-----
Direita Loc6b 1 Direita E6 FIRST 1
Direita E6 WAIT 49.89 SEC
Processo = 6 1 Direita Loc6b LOAD 1
-----
Operador_3 Loc7a #Inspeção do E6
IF sInspecao[6,1] >= sInspecao[6,2] THEN
{ sInspecao[6,1] = 1
  sInspecao[6,2] = 3 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  WAIT mOp3_Ins1 SEC #Inspeção
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sInspecao[6,1]
}
LOAD 1 IFF Processo = 7
WAIT mOp3_At3 SEC #Descarga Carga

#Troca inserto 7A
IF sTrocaInserto[7,1] >= sTrocaInserto[7,2] THEN
{ sTrocaInserto[7,1] = 1
  sTrocaInserto[7,2] = 680 + U(30, 30, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_SEM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[7,1]
}

#Troca inserto 7B
IF sTrocaInserto[8,1] >= sTrocaInserto[8,2] THEN
{ sTrocaInserto[8,1] = 1
  sTrocaInserto[8,2] = 120 + U(20, 20, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[8,1]
}

UNLOAD 1 IFF Processo = 6
1 Operador_3 Loc7b FIRST 1
-----
Operador_3 Loc7b #Inspeção do E7
IF sInspecao[7,1] >= sInspecao[7,2] THEN
{ sInspecao[7,1] = 1
  sInspecao[7,2] = 14 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  WAIT mOp3_Ins2 SEC #Inspeção
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sInspecao[7,1]
}
1 Operador_3 Loc8a FIRST 1 MOVE FOR
mOp3_Mov2 SEC

```

Direita	Loc7a		1	Direita	E7	FIRST 1
Direita	E7	WAIT 46.62 SEC				
		Processo = 7	1	Direita	Loc7a	LOAD 1
Operador_3	Loc8a	LOAD 1 IFF Processo = 8				
		WAIT mOp3_At4 SEC #Descarga carga				
		UNLOAD 1 IFF Processo = 7				
		#Inspeção do E8				
		IF sInspecao[8,1] >= sInspecao[8,2] THEN				
		{ sInspecao[8,1] = 1				
		sInspecao[8,2] = 43 + distInspecao(Stream)				
		GRAPHIC 2				
		WAIT mOp3_Ins3 SEC #Inspeção				
		GRAPHIC 1				
		}ELSE				
		{INC sInspecao[8,1]				
		}				
			1	Operador_3	Loc6a	FIRST 1 MOVE FOR
mOp3_Mov3	SEC					
Direita	Loc8a		1	Direita	E8	FIRST 1
Direita	E8	WAIT 19.8 SEC				
		Processo = 8	1	Direita	Loc8a	LOAD 1
Operador_3	Loc6a	#Larga a peça				
		UNLOAD 1 IFF Processo = 8				
			1	Operador_3	EXIT	FIRST 1
			2*	Operador_3	Loc6b	FIRST 1
Direita	Loc6a		1	Direita	C4	FIRST 1

\*\*\*\*\*  
 \* Arrivals \*  
 \*\*\*\*\*

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Operador_1	Loc4c	1	0	1	1	
Esquerda	E2	1	0	1	1	
Esquerda	E3	1	0	1	1	
Esquerda	E4	1	0	1	1	
Direita	Loc1a	1	0	1	1	
Esquerda	E1	1	0	1	1	
Operador_2	Loc1a	1	0	1	1	
Direita	E6	1	0	1	1	
Direita	E7	1	0	1	1	
Direita	E8	1	0	1	1	
Operador_3	Loc6b	1	0	1	1	
Esquerda	C1	2	0	1	1	Processo = 1
Esquerda	C2	2	0	1	1	Processo = 4
Direita	C3	2	0	1	1	Processo = 1
Direita	C4	2	0	1	1	Processo = 8

\*\*\*\*\*  
 \* Attributes \*  
 \*\*\*\*\*

ID	Type	Classification
Processo	Integer	Entity

\*\*\*\*\*  
 \* Variables (global) \*  
 \*\*\*\*\*

ID	Type	Initial value	Stats
Tempo_de_Ciclo	Real	0	Time Series
Tempo_Anterior	Real	0	Time Series
Itens_E5	Integer	0	Time Series
Caixa_E5	Integer	0	Time Series
Itens_E9	Integer	0	Time Series
Caixa_E9	Integer	0	Time Series
vLAdo	Integer	0	Time Series
cont	Integer	0	Time Series
Var1	Integer	0	Time Series

```

vC1          Integer      0          Time Series
vC3          Integer      0          Time Series

```

```

*****
*                               Arrays                               *
*****

```

```

ID           Dimensions  Type
-----
sTrocaInserto 8,2      Real
sInspecao     9,2      Integer

```

```

*****
*                               Macros                               *
*****

```

```

ID           Text
-----
Stream      #1 : Validação
            2 #: Resultados
mOp1_Mov1   0.198138+1.46415*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.70447)
            #1.85
mOp1_At1    -3.95947+7.78781*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./16.7355)
            #3.87
mOp1_Mov2   0.745572+2.043*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./7.16805)
            #2.86
mOp1_At2    -45.2067+49.3033*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./108.746)
            #4.10
mOp1_Mov3   0.964632+P5(9.47905, 13.1602, Stream)
            #2.52
mOp1_At3    2.00727+1.81341*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.57746)
            #4.08
mOp1_At4    0.498163+1.53435*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./2.1103)
            #2.79
mOp1_Mov4   1.59444+1.48743*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./4.23952)
            #3.23
mOp1_Ins1   3.47842+3.44008*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.3858)
            #7.47
mOp1_Mov5   -0.0825821+1.77306*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./6.07515)
            #1.77
mOp1_Ins2   4.22+P6(1.9794, 8.28981, 27.0869, Stream)
            #11.57
mOp1_Ins3   -102.01+115.078*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./48.6574)
            #13.15
mOp2_At1    B(1.2922, 3.36108, 1.06, 6.39352, Stream)
            #2.54
mOp2_At2    4.33804+W(3.4334, 4.35916, Stream)
            #8.26
mOp2_At3    -2.8879+10.9841*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./8.0759)
            #8.38
mOp2_At4    0.905903+1.91814*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./7.13128)
            #2.89
mOp2_At5    15.51+P6(1.27503, 28587, 73277.7, Stream)
            #18.52
mOp2_Mov1   0.732119+1.36966*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./4.28571)
            #2.23
mOp2_At6    0.688355+W(3.46631, 2.58331, Stream)
            #3.01
mOp2_At7    -739.337+L(752.977, 1.91124, Stream)
            #13.64
mOp2_Mov2   0.75+P6(3.95986, 2655.74, 836.217, Stream)
            #2.00
mOp2_At8    19.07+P6(6.9603, 3.4822, 1.67238, Stream)
            #23.76
mOp2_At9    1.21993+W(8.05804, 51.3189, Stream)
            #49.57
mOp2_At10   11.5262+P5(3.03695, 12.1933, Stream)
            #17.51
mOp2_At11   9.40819+W(4.63628, 8.63284, Stream)
            #17.30
mOp2_Ins1   0.451717+5.39175*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./6.16235)
            #6.08
mOp2_Ins2   22.6644+IG(14.1482, 8.22356, Stream)
            #30.89
mOp2_Ins3   -116.569+W(36.8931, 149.036, Stream)
            #30.27
mOp3_At1    0.74+P6(1.40193, 10.7246, 11.7142, Stream)
            #2.43

```

```

mOp3_At2          -31.8518+35.5341*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./71.2524)
#3.69
mOp3_Mov1         1.33+0.908893*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.38211)
#2.38
mOp3_At3          2.33+3.12256*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./7.32298)
#5.55
mOp3_Mov2         -0.651074+3.27682*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./8.81074)
#2.70
mOp3_At4          -2.37832+6.63022*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./21.6574)
#4.28
mOp3_Mov3         0.444684+W(1.21909, 2.85585, Stream)
#3.12
mOp3_Ins1         3.48097+ER(5.85087, 2.92544, Stream)
#9.33
mOp3_Ins2         4.90297+ER(3.93057, 1.31019, Stream)
#8.83
mOp3_Ins3         -747.593+L(753.6, 1.85726, Stream)
#6.01
mTroca_COM_ajuste 306.499+IG(20.5584, 30.8582, Stream)
#337.36
mTroca_SEM_ajuste 93.32+E(10.464, Stream)
#103.78

```

```

*****
*                               User Distributions                               *
*****
ID          Type          Cumulative  Percentage  Value
-----
distInspecao Discrete    No          33          0
              34          1
              33          2

```

## B.8 Código do cenário alternativo: Caso 2

```

*****
*                               Formatted Listing of Model:                               *
*****
Time Units:          Seconds
Distance Units:     Meters
Initialization Logic: #TRACE STEP
                    #Inicialização da troca de insertos de modo aleatório no
intervalo de cada ferramenta

sTrocaInserto[1,1] = 1
sTrocaInserto[2,1] = 1
sTrocaInserto[3,1] = 1
sTrocaInserto[4,1] = 1
sTrocaInserto[5,1] = 1
sTrocaInserto[6,1] = 1
sTrocaInserto[7,1] = 1
sTrocaInserto[8,1] = 1

sTrocaInserto[1,2] = U(187.5, 187.5)
sTrocaInserto[2,2] = U(70, 70)
sTrocaInserto[3,2] = U(75, 75)
sTrocaInserto[4,2] = U(77.5, 77.5)
sTrocaInserto[5,2] = U(75, 75)
sTrocaInserto[6,2] = U(100, 100)
sTrocaInserto[7,2] = U(370, 370)
sTrocaInserto[8,2] = U(80, 80)

*****
*                               Locations                               *
*****
Name      Cap  Units Stats      Rules      Cost
-----
E2        1    1    Time Series Oldest, ,
E3        1    1    Time Series Oldest, ,
E4        1    1    Time Series Oldest, ,
Loc2a     1    1    Time Series Oldest, ,
Loc3a     1    1    Time Series Oldest, ,
Loc4a     1    1    Time Series Oldest, ,
Loc4b     1    1    Time Series Oldest, ,
Loc4c     1    1    Time Series Oldest, ,

```



```

mOp1_Mov2 SEC
                                         MOVE FOR
                                         2   Operador_1 Loc4a   FIRST 1 #Deslocamento
para a inspeção
                                         MOVE FOR
mOp1_Mov4 SEC
-----
Esquerda  Loc2a                        1   Esquerda  E2           FIRST 1
Esquerda  E2                          WAIT 50.63 SEC
Processo = 2                            1   Esquerda  Loc2a        LOAD 1
-----
Operador_1 Loc4a                       WAIT mOp1_Ins1 SEC
GRAPHIC 1                                1   Operador_1 Loc3a      FIRST 1 MOVE FOR
mOp1_Mov5 SEC
-----
Operador_1 Loc3a                       LOAD 1 IFF Processo = 3
WAIT mOp1_At2 SEC

#Troca inserto 3A
IF sTrocaInserto[4,1] >= sTrocaInserto[4,2] THEN
{ sTrocaInserto[4,1] = 1
  sTrocaInserto[4,2] = 125 + U(15, 15, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[4,1]
}

UNLOAD 1 IFF Processo = 2
                                         1   Operador_1 Loc4a   FIRST 1 MOVE FOR
mOp1_Mov3 SEC
-----
Esquerda  Loc3a                        1   Esquerda  E3           FIRST 1
Esquerda  E3                          WAIT 45.28 SEC
Processo = 3                            1   Esquerda  Loc3a        LOAD 1
-----
Operador_1 Loc4a                       #Inspeção do E3
IF sInspecao[3,1] >= sInspecao[3,2] THEN
{ sInspecao[3,1] = 1
  sInspecao[3,2] = 5 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  WAIT mOp1_Ins2 SEC #inspeção
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sInspecao[3,1]
}

LOAD 1 IFF Processo = 4
WAIT mOp1_At3 SEC #E4
UNLOAD 1 IFF Processo = 3
                                         1   Operador_1 Loc4b   FIRST 1
Esquerda  Loc4a                        1   Esquerda  E4           FIRST 1
Esquerda  E4                          WAIT 16.18 SEC
Processo = 4                            1   Esquerda  Loc4a        LOAD 1
-----
Operador_1 Loc4b                       #Inspeção do E4
IF sInspecao[4,1] >= sInspecao[4,2] THEN
{ sInspecao[4,1] = 1
  sInspecao[4,2] = 13 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  WAIT mOp1_Ins3 SEC #inspeção + larga pç
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sInspecao[4,1]
  WAIT mOp1_At4 SEC #larga pç sem inspeção
}

#2 Operadores #
IF CicloOp1 = 0 THEN
{ INC CicloOp1
  UNLOAD 1 IFF Processo = 4
  ROUTE 1
}
ELSE #Ciclo 2
{ UNLOAD 1 IFF Processo = 4
  CicloOp1 = 0
  ROUTE 2 }
#FIM #
                                         1   Operador_1 Loc4c   FIRST 1
                                         2   Operador_1 Loc1a   FIRST 1 MOVE FOR
(mOp2_Mov1)*3.8/1.7 SEC

```

Operador_1	Loc4c	LOAD 1 IFF Processo = 1	1	Operador_1	Loc2a	FIRST 1	MOVE FOR
mOp1_Mov1 SEC							
Esquerda	Loc4b		1	Esquerda	C2	FIRST 1	
Esquerda	C1	MOVE FOR 0	1	Esquerda	Loc4c	LOAD 1	
Esquerda	C2	MOVE FOR 0	1	Esquerda	Loc1c	LOAD 1	
Operador_1	Loc1a	ORDER 1 Esquerda TO Forjado ORDER 1 Direita TO Forjado LOAD 2 IFF Processo = 0 WAIT mOp2_At1 SEC #pega peça LOAD 2 IFF Processo = 1 WAIT mOp2_At2 SEC #descarga carga  #Troca inserto 1A IF sTrocaInserto[1,1] >= sTrocaInserto[1,2] THEN { sTrocaInserto[1,1] = 1 sTrocaInserto[1,2] = 335 + U(20, 20, Stream) GRAPHIC 3 WAIT mTroca_COM_ajuste SEC GRAPHIC 1 }ELSE { INC sTrocaInserto[1,1] }  UNLOAD 2 IFF Processo = 0  WAIT mOp2_At3 SEC #insp 100% + larga pç  #Inspeção de E1 IF sInspecao[1,1] >= sInspecao[1,2] THEN { sInspecao[1,1] = 1 sInspecao[1,2] = 29 + distInspecao(Stream) GRAPHIC 2 WAIT mOp2_Insl SEC GRAPHIC 1 }ELSE { INC sInspecao[1,1] }  1	Operador_1	Loc1b	FIRST 1		
Esquerda	Forjado	Processo = 0	1	Esquerda	Loc1a	LOAD 1	
Esquerda	Loc1a		1	Esquerda	E1	FIRST 1	
Esquerda	E1	LOAD 1 IFF Processo = 0 AND ENTITY() = 2 WAIT 43.08 SEC UNLOAD 1 IFF Processo = 0 AND ENTITY() = 2 Processo = 1	1	Esquerda	Loc1a	LOAD 1	
Direita	Forjado	Processo = 0	1	Direita	Loc1a	LOAD 1	
Direita	Loc1a		1	Direita	E1	LOAD 1	
Direita	E1	Processo = 1	1	Direita	Loc1a	LOAD 1	
Operador_1	Loc1b	WAIT 0 UNLOAD 2 IFF Processo = 1	1	Operador_1	Loc1c	FIRST 1	
Esquerda	Loc1b		1	Esquerda	C1	FIRST 1	
Direita	Loc1b		1	Direita	C3	FIRST 1	
Operador_1	Loc1c	LOAD 2 IFF Processo = 4 WAIT mOp2_At4 SEC	1	Operador_1	Loc5a	FIRST 1	
Operador_1	Loc5a	IF Itens_E5 = 2 OR Itens_E5 = 1 THEN { #Lamina WAIT mOp2_At5 SEC UNLOAD 2 IFF Processo = 4 INC Itens_E5, 2 IF Itens_E5 = 3 AND Caixa_E5 = 45 THEN {#Preenche o cartão WAIT mOp2_At9 SEC } }  }ELSE { IF Itens_E5 = 3 OR Itens_E5 = 4 THEN {#Lamina e coloca na caixa WAIT mOp2_At8 SEC UNLOAD 2 IFF Processo = 4 INC Itens_E5, 2 DEC Itens_E5, 5					

```

INC Caixa_E5, 5
IF Itens_E5 = 0 AND Caixa_E5 = 50 THEN
{#Libera lote
  WAIT mOp2_At10 SEC
  DEC Caixa_E5, 50
}
}ELSE
{#Inspeção E5 (Lamina e mede)
IF sInspecao[5,1] >= sInspecao[5,2] THEN
{sInspecao[5,1] = 1
sInspecao[5,2] = 1 + distInspecao(Stream) #cada passagem vale 10 pç
GRAPHIC 2
WAIT mOp2_Ins2 SEC
GRAPHIC 1
UNLOAD 2 IFF Processo = 4
INC Itens_E5, 2
}ELSE
{
  WAIT mOp2_At5 SEC #Só lamina as peças
  UNLOAD 2 IFF Processo = 4
  INC Itens_E5, 2
  INC sInspecao[5,1]
}
}
}
}

```

			1	Operador_1	EXIT	FIRST	1
			2*	Operador_1	Loc4c	FIRST	1 MOVE FOR
(mOp2_Mov1)*5.6/1.7 SEC							
Esquerda	Loc5a		1	Esquerda	C5	FIRST	1
Esquerda	C5	COMBINE 5 AS Esquerda					
			1	Esquerda	Saida	FIRST	1
Esquerda	Saida	JOIN 1 Direita					
		INC cont					
		Tempo_de_Ciclo = CLOCK() - Tempo_Anterior					
		Tempo_Anterior = CLOCK()					
			1	Esquerda	EXIT	FIRST	1
Operador_3	Loc9a	IF Itens_E9 = 2 OR Itens_E9 = 1 THEN					
		{ #Lamina					
		WAIT mOp2_At7 SEC					
		UNLOAD 2 IFF Processo = 8					
		INC Itens_E9, 2					
		IF Itens_E9 = 3 AND Caixa_E9 = 45 THEN					
		{#Lamina e preenche o cartão					
		WAIT mOp2_At9 SEC					
		}					
		}					
		}ELSE					
		{ IF Itens_E9 = 3 OR Itens_E9 = 4 THEN					
		{ #Lamina e coloca na caixa					
		WAIT mOp2_At11 SEC					
		UNLOAD 2 IFF Processo = 8					
		INC Itens_E9, 2					
		DEC Itens_E9, 5					
		INC Caixa_E9, 5					
		IF Itens_E9 = 0 AND Caixa_E9 = 50 THEN					
		{#Libera lote					
		WAIT mOp2_At10 SEC					
		DEC Caixa_E9, 50					
		}					
		}					
		}					
		}ELSE					
		{#Inspeção E9 (Lamina e mede)					
		IF sInspecao[9,1] >= sInspecao[9,2] THEN					
		{sInspecao[9,1] = 1					
		sInspecao[9,2] = 0 + distInspecao(Stream) #cada passagem vale 10 pçs					
		GRAPHIC 2					
		WAIT mOp2_Ins3 SEC					
		GRAPHIC 1					
		UNLOAD 2 IFF Processo = 8					
		INC Itens_E9, 2					
		}ELSE					
		{					
		WAIT mOp2_At7 SEC #Só lamina as peças					
		UNLOAD 2 IFF Processo = 8					
		INC Itens_E9, 2					
		}					

```

        INC sInspecao[9,1]
    }
}
}
1   Operador_3 EXIT          FIRST 1
2*  Operador_3 Loc6b        FIRST 1  MOVE FOR
(mOp2_Mov2)*5.9/1.7 SEC
-----
Direita   Loc9a
1   Direita   C6          FIRST 1
-----
Direita   C6      COMBINE 5 AS Direita
1   Direita   Saida      JOIN 1
-----
Direita   Saida
1   Direita   EXIT       FIRST 1
-----
Direita   C3      MOVE FOR 0
1   Direita   Loc6b    LOAD 1
-----
Direita   C4      MOVE FOR 0
1   Direita   Loc1c    LOAD 1
-----
Operador_3 Loc6b  LOAD 1 IFF Processo = 1
WAIT mOp3_At1 SEC #Pega pç
LOAD 1 IFF Processo = 6
WAIT mOp3_At2 SEC #Descarga carga

#Troca inserto 6A
IF sTrocaInserto[5,1] >= sTrocaInserto[5,2] THEN
{ sTrocaInserto[5,1] = 1
  sTrocaInserto[5,2] = 130 + U(10, 10, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_SEM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[5,1]
}

#Troca inserto 6B
IF sTrocaInserto[6,1] >= sTrocaInserto[6,2] THEN
{ sTrocaInserto[6,1] = 1
  sTrocaInserto[6,2] = 160 + U(20, 20, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[6,1]
}

UNLOAD 1 IFF Processo = 1
1   Operador_3 Loc7a        FIRST 1  MOVE FOR
mOp3_Mov1 SEC
-----
Direita   Loc6b
1   Direita   E6          FIRST 1
-----
Direita   E6      WAIT 49.89 SEC
Processo = 6
1   Direita   Loc6b    LOAD 1
-----
Operador_3 Loc7a  #Inspeção do E6
IF sInspecao[6,1] >= sInspecao[6,2] THEN
{ sInspecao[6,1] = 1
  sInspecao[6,2] = 3 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  WAIT mOp3_Ins1 SEC #Inspeção
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sInspecao[6,1]
}
LOAD 1 IFF Processo = 7
WAIT mOp3_At3 SEC #Descarga Carga

#Troca inserto 7A
IF sTrocaInserto[7,1] >= sTrocaInserto[7,2] THEN
{ sTrocaInserto[7,1] = 1
  sTrocaInserto[7,2] = 680 + U(30, 30, Stream)
  GRAPHIC 3
  WAIT mTroca_SEM_ajuste SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sTrocaInserto[7,1]
}

#Troca inserto 7B
IF sTrocaInserto[8,1] >= sTrocaInserto[8,2] THEN
{ sTrocaInserto[8,1] = 1
  sTrocaInserto[8,2] = 120 + U(20, 20, Stream)
  GRAPHIC 3
}

```

```

        WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
        GRAPHIC 1
    }ELSE
    { INC sTrocaInserto[8,1]
    }

    UNLOAD 1 IFF Processo = 6
        1      Operador_3 Loc7b      FIRST 1
-----
Operador_3 Loc7b #Inspeção do E7
                IF sInspecao[7,1] >= sInspecao[7,2] THEN
                { sInspecao[7,1] = 1
                  sInspecao[7,2] = 14 + distInspecao(Stream)
                  GRAPHIC 2
                  WAIT mOp3_Ins2 SEC #Inspeção
                  GRAPHIC 1
                }ELSE
                { INC sInspecao[7,1]
                }
                1      Operador_3 Loc8a      FIRST 1  MOVE FOR
-----
mOp3_Mov2 SEC
Direita  Loc7a      1      Direita  E7      FIRST 1
-----
Direita  E7      WAIT 46.62 SEC
                Processo = 7      1      Direita  Loc7a      LOAD 1
-----
Operador_3 Loc8a  LOAD 1 IFF Processo = 8
                WAIT mOp3_At4 SEC #Descarga carga
                UNLOAD 1 IFF Processo = 7

                #Inspeção do E8
                IF sInspecao[8,1] >= sInspecao[8,2] THEN
                { sInspecao[8,1] = 1
                  sInspecao[8,2] = 43 + distInspecao(Stream)
                  GRAPHIC 2
                  WAIT mOp3_Ins3 SEC #Inspeção
                  GRAPHIC 1
                }ELSE
                {INC sInspecao[8,1]
                }

                1      Operador_3 Loc6a      FIRST 1  MOVE FOR
-----
mOp3_Mov3 SEC
Direita  Loc8a      1      Direita  E8      FIRST 1
-----
Direita  E8      WAIT 19.8 SEC
                Processo = 8      1      Direita  Loc8a      LOAD 1
-----
Operador_3 Loc6a  #Larga a peça
                UNLOAD 1 IFF Processo = 8

                #2 Operadores #
                IF CicloOp2 = 0 THEN
                { INC CicloOp2
                  ROUTE 1
                }
                ELSE #Ciclo 2
                { CicloOp2 = 0
                  ROUTE 2 }
                #FIM #

                1      Operador_3 Loc6b      FIRST 1
                2      Operador_3 Loc1a      FIRST 1  MOVE FOR
-----
(mOp2_Mov2)*5.8/1.7 SEC
Direita  Loc6a      1      Direita  C4      FIRST 1
-----
Operador_3 Loc1a  ORDER 1 Esquerda TO Forjado
                ORDER 1 Direita TO Forjado
                LOAD 2 IFF Processo = 0
                WAIT mOp2_At1 SEC #pega peça
                LOAD 2 IFF Processo = 1
                WAIT mOp2_At2 SEC #descarga carga

                #Troca inserto 1A
                IF sTrocaInserto[1,1] >= sTrocaInserto[1,2] THEN
                { sTrocaInserto[1,1] = 1
                  sTrocaInserto[1,2] = 335 + U(20, 20, Stream)
                  GRAPHIC 3
                  WAIT mTroca_COM_ajuste SEC
                  GRAPHIC 1
                }ELSE
                { INC sTrocaInserto[1,1]
                }

```

```

UNLOAD 2 IFF Processo = 0

WAIT mOp2_At3 SEC #insp 100% + larga pç

#Inspeção de E1
IF sInspecao[1,1] >= sInspecao[1,2] THEN
{ sInspecao[1,1] = 1
  sInspecao[1,2] = 29 + distInspecao(Stream)
  GRAPHIC 2
  WAIT mOp2_Insl SEC
  GRAPHIC 1
}ELSE
{ INC sInspecao[1,1]
}
} 1 Operador_3 Loc1b FIRST 1
-----
Operador_3 Loc1b WAIT 0
UNLOAD 2 IFF Processo = 1
} 1 Operador_3 Loc1c FIRST 1
-----
Operador_3 Loc1c LOAD 2 IFF Processo = 8
WAIT mOp2_At6 SEC #pega pç + mov
} 1 Operador_3 Loc9a FIRST 1
-----

```

\*\*\*\*\*  
\* Arrivals \*  
\*\*\*\*\*

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Operador_1	Loc4c	1	0	1	1	
Esquerda	E2	1	0	1	1	
Esquerda	E3	1	0	1	1	
Esquerda	E4	1	0	1	1	
Direita	Loc1a	1	0	1	1	
Esquerda	E1	1	0	1	1	
Direita	E6	1	0	1	1	
Direita	E7	1	0	1	1	
Direita	E8	1	0	1	1	
Operador_3	Loc6b	1	0	1	1	
Esquerda	C1	2	0	1	1	Processo = 1
Direita	C3	2	0	1	1	Processo = 1

\*\*\*\*\*  
\* Attributes \*  
\*\*\*\*\*

ID	Type	Classification
Processo	Integer	Entity

\*\*\*\*\*  
\* Variables (global) \*  
\*\*\*\*\*

ID	Type	Initial value	Stats
Tempo_de_Ciclo	Real	0	Time Series
Tempo_Anterior	Real	0	Time Series
Itens_E5	Integer	0	Time Series
Caixa_E5	Integer	0	Time Series
Itens_E9	Integer	0	Time Series
Caixa_E9	Integer	0	Time Series
vLAdo	Integer	0	Time Series
cont	Integer	0	Time Series
CicloOp1	Integer	0	Time Series
CicloOp2	Integer	0	Time Series

\*\*\*\*\*  
\* Arrays \*  
\*\*\*\*\*

ID	Dimensions	Type
sTrocaInserto	8,2	Real
sInspecao	9,2	Integer

\*\*\*\*\*  
\* Macros \*  
\*\*\*\*\*

ID	Text
----	------

```

Stream          #1 : Validação
                3 #: Resultados
mOp1_Mov1      0.198138+1.46415*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.70447)
                #1.85
mOp1_At1       -3.95947+7.78781*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./16.7355)
                #3.87
mOp1_Mov2      0.745572+2.043*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./7.16805)
                #2.86
mOp1_At2       -45.2067+49.3033*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./108.746)
                #4.10
mOp1_Mov3      0.964632+P5(9.47905, 13.1602, Stream)
                #2.52
mOp1_At3       2.00727+1.81341*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.57746)
                #4.08
mOp1_At4       0.498163+1.53435*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./2.1103)
                #2.79
mOp1_Mov4      1.59444+1.48743*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./4.23952)
                #3.23
mOp1_Ins1      3.47842+3.44008*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.3858)
                #7.47
mOp1_Mov5      -0.0825821+1.77306*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./6.07515)
                #1.77
mOp1_Ins2      4.22+P6(1.9794, 8.28981, 27.0869, Stream)
                #11.57
mOp1_Ins3      -102.01+115.078*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./48.6574)
                #13.15
mOp2_At1       B(1.2922, 3.36108, 1.06, 6.39352, Stream)
                #2.54
mOp2_At2       4.33804+W(3.4334, 4.35916, Stream)
                #8.26
mOp2_At3       -2.8879+10.9841*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./8.0759)
                #8.38
mOp2_At4       0.905903+1.91814*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./7.13128)
                #2.89
mOp2_At5       15.51+P6(1.27503, 28587, 73277.7, Stream)
                #18.52
mOp2_Mov1      0.732119+1.36966*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./4.28571)
                #2.23
mOp2_At6       0.688355+W(3.46631, 2.58331, Stream)
                #3.01
mOp2_At7       -739.337+L(752.977, 1.91124, Stream)
                #13.64
mOp2_Mov2      0.75+P6(3.95986, 2655.74, 836.217, Stream)
                #2.00
mOp2_At8       19.07+P6(6.9603, 3.4822, 1.67238, Stream)
                #23.76
mOp2_At9       1.21993+W(8.05804, 51.3189, Stream)
                #49.57
mOp2_At10      11.5262+P5(3.03695, 12.1933, Stream)
                #17.51
mOp2_At11      9.40819+W(4.63628, 8.63284, Stream)
                #17.30
mOp2_Ins1      0.451717+5.39175*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./6.16235)
                #6.08
mOp2_Ins2      22.6644+IG(14.1482, 8.22356, Stream)
                #30.89
mOp2_Ins3      -116.569+W(36.8931, 149.036, Stream)
                #30.27
mOp3_At1       0.74+P6(1.40193, 10.7246, 11.7142, Stream)
                #2.43
mOp3_At2       -31.8518+35.5341*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./71.2524)
                #3.69
mOp3_Mov1      1.33+0.908893*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./3.38211)
                #2.38
mOp3_At3       2.33+3.12256*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./7.32298)
                #5.55
mOp3_Mov2      -0.651074+3.27682*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./8.81074)
                #2.70
mOp3_At4       -2.37832+6.63022*(1./((1./U(0.5,0.5, Stream))-1.))**(1./21.6574)
                #4.28
mOp3_Mov3      0.444684+W(1.21909, 2.85585, Stream)
                #3.12
mOp3_Ins1      3.48097+ER(5.85087, 2.92544, Stream)
                #9.33
mOp3_Ins2      4.90297+ER(3.93057, 1.31019, Stream)
                #8.83
mOp3_Ins3      -747.593+L(753.6, 1.85726, Stream)

```

```

#6.01
mTroca_COM_ajuste 306.499+IG(20.5584, 30.8582, Stream)
#337.36
mTroca_SEM_ajuste 93.32+E(10.464, Stream)
#103.78

```

```

*****
*                               User Distributions                               *
*****
ID          Type      Cumulative  Percentage  Value
-----
distInspecao Discrete   No          33          0
              Discrete   No          34          1
              Discrete   No          33          2

```

**APÊNDICE C – Caso 3**

## C.1 Dados coletados para o operador 1: Caso 3

	<b>Op1At1</b>	<b>Op1Mov1</b>	<b>Op1At2</b>	<b>Op1At3</b>	<b>Op1Mov2</b>
1	12,44	1,41	14,91	6,41	1,46
2	10,24	1,36	16,06	3,24	0,93
3	9,69	1,02	8,27	7,44	1,86
4	8,94	1,52	7,41	2,58	1,69
5	9,55	0,80	6,33	7,11	1,17
6	13,07	1,53	8,38	3,35	1,30
7	13,68	0,96	10,89	3,28	1,17
8	12,80	1,77	7,31	4,80	1,66
9	11,22	1,08	6,75	5,57	1,30
10	8,86	1,66	8,38	4,24	1,50
11	10,24	1,39	6,82	3,83	1,57
12	9,64	1,30	12,34	4,72	1,24
13	11,22	1,16	7,91	7,19	1,09
14	11,13	1,83	9,60	4,58	1,38
15	14,77	1,49	6,60	6,79	1,25
16	10,25	1,03	7,38	4,20	1,43
17	9,32	1,46	13,05	4,13	1,37
18	9,75	1,20	7,01	3,56	1,51
19	9,10	0,93	5,02	3,64	1,49
20	9,73	1,05	26,60	4,08	1,69
21	11,42	1,50	7,14	2,94	2,47
22	9,65	1,16	7,52	4,11	1,29
23	8,55	0,92	7,44	3,30	1,42
24	8,50	1,41	8,25	4,87	1,46
25	10,05	1,33	8,03	3,04	1,78
26	9,64	1,43	5,83	3,92	1,57
27	10,86	1,18	5,97	7,51	1,55
28	13,79	1,64	7,26	3,28	1,29
29	12,72	1,11	12,03	5,56	1,70
30	12,27	1,04	7,45	4,67	1,14
31	10,58	0,75	6,37	5,60	1,83
32	9,77	1,60	8,02	5,66	1,53
33	9,23	1,14	12,76	5,59	1,19
34	9,83	1,40	7,01	3,61	1,61
35	12,21	1,29	7,28	5,52	1,22
36	14,67	1,45	8,21	5,05	1,32
37	10,29	1,14	6,20	4,01	1,12
38	9,61	1,74	10,82	4,41	1,40
39	9,28	1,49	7,61	3,95	2,11
40	13,48	0,96	5,61	3,57	1,37

## C.2 Dados coletados para o operador 2: Caso 3

	<b>Op2At1</b>	<b>Op2At2</b>	<b>Op2At3</b>	<b>Op2At4</b>
1	6,22	1,64	9,05	8,53
2	6,38	3,53	7,49	7,84
3	5,47	2,00	8,24	9,16
4	4,50	2,07	5,28	4,63
5	5,94	2,35	3,36	4,89
6	3,13	4,88	5,61	5,41
7	3,22	3,19	4,25	4,88
8	3,44	3,05	5,66	5,35
9	5,44	4,21	4,68	3,32
10	4,74	3,00	4,83	4,64
11	4,52	3,81	4,41	8,41
12	4,69	4,10	3,94	5,72
13	5,20	3,52	4,58	4,94
14	3,99	2,22	5,57	5,03
15	4,89	2,49	5,13	6,06
16	4,16	3,31	3,70	7,02
17	3,11	3,49	3,75	4,77
18	4,35	6,29	3,54	4,99
19	7,83	2,89	3,81	8,19
20	5,38	3,83	3,55	5,72
21	3,42	2,80	4,03	4,51
22	6,19	2,81	5,03	8,32
23	4,41	1,79	5,17	8,55
24	8,11	2,08	4,00	7,54
25	4,97	3,82	4,46	12,11
26	5,49	1,91	4,49	10,62
27	4,88	2,85	5,08	11,31
28	4,66	3,30	4,80	6,52
29	5,31	2,81	6,37	7,65
30	5,30	2,99	5,52	7,77
31	5,11	4,79	5,31	8,11
32	5,24	4,05	4,11	6,91
33	5,67	3,60	5,55	6,47
34	5,07	4,17	5,47	7,74
35	5,82	3,13	6,06	7,72
36	5,64	2,86	5,36	6,61
37	7,94	4,44	5,52	8,46
38	5,49	2,83	5,24	8,78
39	4,91	2,25	5,27	8,95
40	5,42	3,03	4,53	9,78

## C.3 Dados coletados para o operador 3: Caso 3

	<b>Op3At1</b>	<b>Op3Mov1</b>	<b>Op3At2</b>	<b>Op3Mov2</b>	<b>Op3At3</b>
1	8,58	0,45	10,29	0,80	28,57
2	10,09	0,85	10,72	0,73	25,22
3	8,86	0,54	8,94	1,01	24,63
4	9,14	0,89	25,94	0,84	24,68
5	9,12	0,66	11,39	0,81	26,62
6	9,28	0,52	12,06	0,67	24,20
7	10,55	0,47	12,46	1,33	27,56
8	8,91	0,83	10,89	0,89	23,20
9	15,61	0,55	14,50	0,78	25,62
10	11,86	0,61	10,74	0,72	27,46
11	14,35	0,75	14,13	0,75	
12	15,49	0,60	12,50	0,82	
13	15,22	0,71	9,74	1,06	
14	12,63	0,67	8,30	1,16	
15	15,19	0,67	9,83	0,97	
16	16,05	0,60	8,83	1,23	
17	13,78	0,79	9,60	1,19	
18	11,98	0,50	9,00	1,07	
19	12,04	0,63	10,22	0,77	
20	17,47	0,69	9,09	0,83	
21	11,50	0,74	16,07	1,05	
22	11,35	0,82	12,53	1,18	
23	8,10	0,70	9,71	1,07	
24	12,83	0,57	9,79	0,73	
25	14,77	0,55	21,06	0,78	
26	4,25	0,63	10,02	1,02	
27	11,00	0,69	14,59	0,73	
28	15,56	0,70	18,52	0,94	
29	11,81	0,77	9,66	0,72	
30	10,50	0,69	15,76	0,83	
31	13,38	0,43	9,85	0,82	
32	14,72	0,66	10,18	0,93	
33	10,24	0,70	9,52	0,94	
34	14,89	0,99	9,73	1,26	
35	11,14	0,61	9,77	0,94	
36	9,09	0,76	8,79	1,17	
37	16,37	0,86	10,93	0,82	
38	16,96	0,84	9,14	0,82	
39	12,44	0,74	10,62	0,79	
40	8,50	0,51	11,38	0,73	



aTrocaInserito[2,2] = U(300,300)

```

*****
*
*                               Locations
*
*****
Name      Cap      Units Stats      Rules      Cost
-----
Forjado   1          1      Time Series Oldest, ,
E1        1          1      Time Series Oldest, ,
E2        2          1      Time Series Oldest, ,
E3        1          1      Time Series Oldest, ,
E4        1          1      Time Series Oldest, ,
E5        1          1      Time Series Oldest, ,
oleo     5          1      Time Series Oldest, ,
PA        6          1      Time Series Oldest, ,
C1        INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
C2        INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Loc1      1          1      Time Series Oldest, ,
Loc2      1          1      Time Series Oldest, ,
Loc3a     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc3b     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc4      1          1      Time Series Oldest, ,
Loc5a     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc5b     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc6      1          1      Time Series Oldest, ,
Loc7      1          1      Time Series Oldest, ,
Loc8      1          1      Time Series Oldest, ,

*****
*
*                               Entities
*
*****
Name      Speed (mpm) Stats      Cost
-----
Peca      50          Time Series
Operador1 50          Time Series
Operador2 50          Time Series
Operador3 50          Time Series

*****
*
*                               Processing
*
*****
Process   Location Operation      Routing
Entity    Location Operation      Blk Output Destination Rule Move Logic
-----
Peca      Forjado  Processo = 0      1 Peca      Loc1      LOAD 1
Operador1 Loc1      ORDER 1 Peca TO Forjado
LOAD 1 IFF Processo = 0
LOAD 1 IFF Processo = 1

#Troca inserto E1
IF aTrocaInserito[1,1] >= aTrocaInserito[1,2] THEN
{ aTrocaInserito[1,1] = 1
  aTrocaInserito[1,2] = 25 + U(5, 5, Stream)
  WAIT mTrocaE1 MIN
}ELSE
{ INC aTrocaInserito[1,1]
}

WAIT mOplAt1 SEC
UNLOAD 1 IFF Processo = 0

1 Operador1 Loc2      FIRST 1 MOVE FOR mOplMov1
SEC
Peca      Loc1      1 Peca      E1      FIRST 1
Peca      E1      WAIT 33.30 SEC
Processo = 1      1 Peca      Loc1      LOAD 1
Operador1 Loc2      LOAD 1 IFF Processo = 2
WAIT mOplAt2 SEC
WAIT UNTIL FimCiclo1 = 1
FimCiclo1 = 0
UNLOAD 1 IFF Processo = 1
AcionaE2=1

1 Operador1 Loc3a      FIRST 1
Peca      Loc2      1 Peca      E2      FIRST 1
Peca      E2      WAIT 50.85 SEC #Ciclo 1
FimCiclo1 = 1

```

		WAIT UNTIL AcionaE2 = 1 AcionaE2 = 0 WAIT 9.60 SEC #Ciclo 2 Processo = 2	1	Peca	Loc2	LOAD 1	
Operador1	Loc3a	LOAD 1 IFF Processo = 3 WAIT mOp1At3 SEC UNLOAD 1 IFF Processo = 2	1	Operador1	Loc3b	FIRST 1	
Peca	Loc3a		1	Peca	E3	FIRST 1	
Peca	E3	WAIT 49.51 SEC Processo = 3	1	Peca	Loc3a	LOAD 1	
Operador1	Loc3b	WAIT UNTIL vC1 < 40 UNLOAD 1 IFF Processo = 3	1	Operador1	EXIT	FIRST 1	
			2*	Operador1	Loc1	FIRST 1	MOVE FOR mOp1Mov2
SEC							
Peca	Loc3b		1	Peca	C1	FIRST 1	
Peca	C1	MOVE FOR 0 vC1 = CONTENTS(C1)	1	Peca	Loc4	LOAD 1	vC1 =
CONTENTS(C1)							
Operador2	Loc4	LOAD 1 IFF Processo = 3 LOAD 1 IFF Processo = 4 WAIT mOp2At1 SEC #Desc. Carga E4 UNLOAD 1 IFF Processo = 3 WAIT mOp2At2 SEC #Atividade pós E4	1	Operador2	Loc5a	FIRST 1	
Peca	Loc4		1	Peca	E4	FIRST 1	
Peca	E4	WAIT 43.74 SEC Processo = 4	1	Peca	Loc4	LOAD 1	
Operador2	Loc5a	LOAD 1 IFF Processo = 5  #Troca inserto E1 IF aTrocaInserto[2,1] >= aTrocaInserto[2,2] THEN { aTrocaInserto[2,1] = 1 aTrocaInserto[2,2] = 585 + U(15, 15, Stream) WAIT mTrocaE5 MIN }ELSE { INC aTrocaInserto[2,1] }					
		WAIT mOp2At3 SEC #Desc. carga E5 UNLOAD 1 IFF Processo = 4	1	Operador2	Loc5b	FIRST 1	
Peca	Loc5a		1	Peca	E5	FIRST 1	
Peca	E5	WAIT 56.95 SEC Processo = 5	1	Peca	Loc5a	LOAD 1	
Operador2	Loc5b	WAIT mOp2At4 SEC #Atividade 7 WAIT UNTIL vC2 < 10 UNLOAD 1 IFF Processo = 5	1	Operador2	EXIT	FIRST 1	
			2*	Operador2	Loc4	FIRST 1	
Peca	Loc5b		1	Peca	C2	FIRST 1	
Peca	C2	MOVE FOR 0 vC2 = CONTENTS(C2)	1	Peca	Loc6	LOAD 1	vC2 =
CONTENTS(C2)							
Operador3	Loc6	LOAD 1 IFF Processo = 5 WAIT mOp3At1 SEC	1	Operador3	Loc7	FIRST 1	MOVE FOR mOp3Mov1
SEC							
Operador3	Loc7	WAIT mOp3At2 SEC IF CONTENTS(oleo)=5 THEN { LOAD 5 IFF Processo = 5 ROUTE 3 } ELSE { UNLOAD 1 IFF Processo = 5 ROUTE 1 ROUTE 2 }					
			1*	Operador3	Loc6	FIRST 1	MOVE FOR mOp3Mov2
			2	Operador3	EXIT	FIRST 1	
			3	Operador3	Loc8	FIRST 1	
Peca	Loc7		1	Peca	oleo	FIRST 1	
Peca	oleo		1	Peca	Loc7	LOAD 1	

Operador3	Loc8	WAIT mOp3At3 SEC				
		UNLOAD 6				
			1	Operador3	EXIT	FIRST 1
			2*	Operador3	Loc6	FIRST 1 MOVE FOR mOp3Mov2
SEC						
Peca	Loc8		1	Peca	PA	FIRST 1
Peca	PA	TempoCiclo = CLOCK() - CicloAnterior				
		CicloAnterior = CLOCK()				
			1	Peca	EXIT	FIRST 1

```
*****
*
* Arrivals
*
*****
```

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Peca	E1	1	0	1	1	
Peca	E2	2	0	1	1	
Peca	E3	1	0	1	1	
Operador1	Loc1	1	0	1	1	
Peca	E4	1	0	1	1	
Peca	E5	1	0	1	1	
Operador2	Loc4	1	0	1	1	
Operador3	Loc6	1	0	1	1	
Peca	C1	1	0	1	1	Processo = 3

```
*****
*
* Attributes
*
*****
```

ID	Type	Classification
Processo	Integer	Entity

```
*****
*
* Variables (global)
*
*****
```

ID	Type	Initial value	Stats
TempoCiclo	Real	0	Time Series
CicloAnterior	Real	0	Time Series
AcionaE2	Integer	1	Time Series
FimCiclo1	Integer	0	Time Series
vC1	Integer	0	Time Series
vC2	Integer	0	Time Series

```
*****
*
* Arrays
*
*****
```

ID	Dimensions	Type
aTrocaInserto	2,2	Real

```
*****
*
* Macros
*
*****
```

ID	Text
Stream	#1 : Validação
	2 #: Resultados
mOp1At1	8.38713+G(1.74712, 1.38122)
	#10.80
mOp1Mov1	-73.8748+G(58482.5, 0.00128527)
	#1.29
mOp1At2	5.02+2.78787*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./2.43916)
	#8.76
mOp1At3	2.48675+W(1.67638, 2.39202)
	#4.62
mOp1Mov2	0.237417+P5(20.7707, 24.1795)
	#1.46
mOp2At1	-3.23881+8.31093*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./13.6072)
	#5.15
mOp2At2	-0.188952+3.28116*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./6.35609)
	#3.23
mOp2At3	2.39915+2.43694*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./4.13729)
	#5.09
mOp2At4	-2.92633+G(25.5202, 0.392908)
	#7.10

```

mOp3At1      -2.08189+W(5.55863, 15.407)
              #12.15
mOp3Mov1     -0.909425+IG(243.651, 1.58292)
              #0.67
mOp3At2      7.50286+P5(2.63154, 6.94301)
              #11.76
mOp3Mov2     0.592658+IG(0.908867, 0.324842)
              #0.92
mOp3At3      19.9531+5.61716*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./5.79483)
              #25.86
mTrocaE1     T(0.7, 1.0, 1.3)
              #1
mTrocaE5     T(2.0, 2.5, 3.0)
              #2.5

```

### C.7 Código do cenário alternativo: Caso 3

```

*****
*                               Formatted Listing of Model:                               *
*****
Time Units:                      Seconds
Distance Units:                   Meters
Initialization Logic:             #TRACE STEP

                                   #Inicializa as variaveis de troca de inserto
                                   aTrocaInserto[1,1] = 1
                                   aTrocaInserto[2,1] = 1
                                   aTrocaInserto[1,2] = U(15,15)
                                   aTrocaInserto[2,2] = U(300,300)

*****
*                               Locations                                                 *
*****
Name      Cap      Units  Stats      Rules      Cost
-----
Forjado   1          1      Time Series Oldest, ,
E1        1          1      Time Series Oldest, ,
E2        2          1      Time Series Oldest, ,
E3        1          1      Time Series Oldest, ,
E4        1          1      Time Series Oldest, ,
E5        1          1      Time Series Oldest, ,
oleo     5          1      Time Series Oldest, ,
PA       6          1      Time Series Oldest, ,
C1       INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
C2       INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
Loc1     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc2     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc3a    1          1      Time Series Oldest, ,
Loc3b    1          1      Time Series Oldest, ,
Loc4     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc5a    1          1      Time Series Oldest, ,
Loc5b    1          1      Time Series Oldest, ,
Loc6     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc7     1          1      Time Series Oldest, ,
Loc8     1          1      Time Series Oldest, ,

*****
*                               Entities                                                 *
*****
Name      Speed (mpm)  Stats      Cost
-----
Peca      50              Time Series
Operador1 50              Time Series
Operador2 50              Time Series

*****
*                               Processing                                               *
*****
Process
Entity   Location Operation      Routing
Blk      Output      Destination Rule      Move Logic
-----
Peca     Forjado  Processo = 0      1      Peca     Loc1      LOAD 1
Operador1 Loc1     ORDER 1 Peca TO Forjado

```

```

LOAD 1 IFF Processo = 0
LOAD 1 IFF Processo = 1

#Troca inserto E1
IF aTrocaInserto[1,1] >= aTrocaInserto[1,2] THEN
{ aTrocaInserto[1,1] = 1
  aTrocaInserto[1,2] = 25 + U(5, 5, Stream)
  WAIT mTrocaE1 MIN
}ELSE
{ INC aTrocaInserto[1,1]
}

WAIT mOplAt1 SEC
UNLOAD 1 IFF Processo = 0
1 Operador1 Loc2 FIRST 1 MOVE FOR mOplMov1
SEC
Peca Loc1 1 Peca E1 FIRST 1
Peca E1 WAIT 33.30 SEC
Processo = 1 1 Peca Loc1 LOAD 1
Operador1 Loc2 LOAD 1 IFF Processo = 2
WAIT mOplAt2 SEC
WAIT UNTIL FimCiclo1 = 1
FimCiclo1 = 0
UNLOAD 1 IFF Processo = 1
AcionaE2=1
1 Operador1 Loc3a FIRST 1
Peca Loc2 1 Peca E2 FIRST 1
Peca E2 WAIT 50.85 SEC #Ciclo 1
FimCiclo1 = 1
WAIT UNTIL AcionaE2 = 1
AcionaE2 = 0
WAIT 9.60 SEC #Ciclo 2
Processo = 2 1 Peca Loc2 LOAD 1
Operador1 Loc3a LOAD 1 IFF Processo = 3
WAIT mOplAt3 SEC
UNLOAD 1 IFF Processo = 2
1 Operador1 Loc3b FIRST 1
Peca Loc3a 1 Peca E3 FIRST 1
Peca E3 WAIT 49.51 SEC
Processo = 3 1 Peca Loc3a LOAD 1
Operador1 Loc3b WAIT UNTIL vC1 < 40
UNLOAD 1 IFF Processo = 3
1 Operador1 EXIT FIRST 1
2* Operador1 Loc1 FIRST 1 MOVE FOR mOplMov2
SEC
Peca Loc3b 1 Peca C1 FIRST 1
Peca C1 MOVE FOR 0
vC1 = CONTENTS(C1)
1 Peca Loc4 LOAD 1 vC1 =
CONTENTS(C1)
Operador2 Loc4 LOAD 1 IFF Processo = 3
LOAD 1 IFF Processo = 4
WAIT mOp2At1 SEC #Desc. Carga E4
UNLOAD 1 IFF Processo = 3
WAIT mOp2At2 SEC #Atividade pós E4
1 Operador2 Loc5a FIRST 1
Peca Loc4 1 Peca E4 FIRST 1
Peca E4 WAIT 43.74 SEC
Processo = 4 1 Peca Loc4 LOAD 1
Operador2 Loc5a LOAD 1 IFF Processo = 5

#Troca inserto E1
IF aTrocaInserto[2,1] >= aTrocaInserto[2,2] THEN
{ aTrocaInserto[2,1] = 1
  aTrocaInserto[2,2] = 585 + U(15, 15, Stream)
  WAIT mTrocaE5 MIN
}ELSE
{ INC aTrocaInserto[2,1]
}

WAIT mOp2At3 SEC #Desc. carga E5
UNLOAD 1 IFF Processo = 4
1 Operador2 Loc5b FIRST 1
Peca Loc5a 1 Peca E5 FIRST 1

```

Peca	E5	WAIT 56.95 SEC					
		Processo = 5	1	Peca	Loc5a	LOAD	1
Operador2	Loc5b	WAIT mOp2At4 SEC #Atividade 7					
			1	Operador2	Loc6	FIRST	1
Operador2	Loc6	WAIT mOp3At1 SEC	1	Operador2	Loc7	FIRST	1
						MOVE FOR	mOp3Mov1
Operador2	Loc7	WAIT mOp3At2 SEC					
		IF CONTENTS(oleo)=5 THEN					
		{ LOAD 5 IFF Processo = 5					
		ROUTE 3					
		}					
		ELSE { UNLOAD 1 IFF Processo = 5					
		ROUTE 1					
		ROUTE 2 }					
			1*	Operador2	Loc4	FIRST	1
						MOVE FOR	
(mOp3Mov2)*3.19/0.88 SEC			2	Operador2	EXIT	FIRST	1
			3	Operador2	Loc8	FIRST	1
Peca	Loc7		1	Peca	oleo	FIRST	1
Peca	oleo		1	Peca	Loc7	LOAD	1
Operador2	Loc8	WAIT mOp3At3 SEC					
		UNLOAD 6					
			1	Operador2	EXIT	FIRST	1
			2*	Operador2	Loc4	FIRST	1
						MOVE FOR	
(mOp3Mov2)*3.19/0.88 SEC							
Peca	Loc8		1	Peca	PA	FIRST	1
Peca	PA	TempoCiclo = CLOCK() - CicloAnterior					
		CicloAnterior = CLOCK()					
			1	Peca	EXIT	FIRST	1

\*\*\*\*\*  
 \* Arrivals \*

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Peca	E1	1	0	1	1	
Peca	E2	2	0	1	1	
Peca	E3	1	0	1	1	
Operador1	Loc1	1	0	1	1	
Peca	E4	1	0	1	1	
Peca	E5	1	0	1	1	
Operador2	Loc4	1	0	1	1	
Peca	C1	1	0	1	1	Processo = 3

\*\*\*\*\*  
 \* Attributes \*

ID	Type	Classification
Processo	Integer	Entity

\*\*\*\*\*  
 \* Variables (global) \*

ID	Type	Initial value	Stats
TempoCiclo	Real	0	Time Series
CicloAnterior	Real	0	Time Series
AcionaE2	Integer	1	Time Series
FimCiclo1	Integer	0	Time Series
vC1	Integer	0	Time Series
vC2	Integer	0	Time Series

\*\*\*\*\*  
 \* Arrays \*

ID	Dimensions	Type
aTrocaInserto	2,2	Real

\*\*\*\*\*  
 \* Macros \*

ID	Text

```

Stream          #1 : Validação
                3 # : Resultados
mOp1At1         8.38713+G(1.74712, 1.38122)
                #10.80
mOp1Mov1        -73.8748+G(58482.5, 0.00128527)
                #1.29
mOp1At2         5.02+2.78787*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./2.43916)
                #8.76
mOp1At3         2.48675+W(1.67638, 2.39202)
                #4.62
mOp1Mov2        0.237417+P5(20.7707, 24.1795)
                #1.46
mOp2At1         -3.23881+8.31093*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./13.6072)
                #5.15
mOp2At2         -0.188952+3.28116*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./6.35609)
                #3.23
mOp2At3         2.39915+2.43694*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./4.13729)
                #5.09
mOp2At4         -2.92633+G(25.5202, 0.392908)
                #7.10
mOp3At1         -2.08189+W(5.55863, 15.407)
                #12.15
mOp3Mov1        -0.909425+IG(243.651, 1.58292)
                #0.67
mOp3At2         7.50286+P5(2.63154, 6.94301)
                #11.76
mOp3Mov2        0.592658+IG(0.908867, 0.324842)
                #0.92
mOp3At3         19.9531+5.61716*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./5.79483)
                #25.86
mTrocaE1        T(0.7, 1.0, 1.3)
                #1
mTrocaE5        T(2.0, 2.5, 3.0)
                #2.5

```